ISSN 1157-4887

LES CAHIERS DE SCIENCE & VIE

GRANDS INGÉNIEURS

LÉONARD DE VINCI ET SES PRÉCURSEURS

ORS SÉRIE - N°34 - AOÛT 1996. 32 F -
0 FB - 10,30 FS - PORTUGAL CONT 850 Esc - 50 Dh
,800 DT - $CAN 5.95. Réunion, Antilles, Guyane - 38F



Les mondes souterrains : des profondeurs jaillissent les plus grands mystères !



Des êtres étranges peuplent les mondes souterrains et des histoires mystérieuses s'y déroulent. Partez à la rencontre de lieux magiques, d'animaux étonnants et de trésors à découvrir.

Les DOSSIERS HORS SERIE DE SCIENCE & VIE JUNIOR vous invitent à un voyage au cœur des ténèbres.

EN VENTE PARTOUT

SCIENCE & VIE JUNIOR
DOSSIER HORS SERIE

PHOTO MAGNUM

LES SECRETS DU TRAIT JUSTE

Mis à part les cancres, ceux qui répètent des calembours éculés mais n'inventent jamais rien de sérieux – "c'est en sciant que Léonard devint scie". "Denis M..., vous me le copierez cent fois" –, tous les bons élèves, ceux qui veulent plus tard "faire ingénieur", savent que Léonard fut le plus grand de leur future communauté. Leurs pères, leurs grands-pères et leurs arrières grands-pères, sans doute ingénieurs eux-mêmes, le savaient déjà. Quant à leurs arrières arrières grands-pères, qui ont vécu vers la fin du XIXe siècle, ils venaient, eux, de l'apprendre, puisque c'est l'époque où l'on redécouvre les textes et dessins de Léonard qui peuvent en témoigner.

C'est un émerveillement. On y voit les sous-marins, les hélicoptères, les parachutes, les chariots automobiles, et les machines volantes, sortes de deltaplanes dont les ailes articulées seront mues par les bras de l'homme allongé sous elles.

Que, dans l'histoire des débuts de l'aviation, la réussite soit précisément venue de l'abandon radical de la piste qui consistait à imiter l'oiseau, ne changea rien à l'affaire : ceux-là mêmes, qui surent faire décoller des plus lourds que l'air, ou faire rouler des voitures à essence à des vitesses jamais atteintes, le proclamèrent haut et fort. Léonard était leur précurseur, le premier, le père fondateur de leurs valeurs et de leur monde technique.

Ce mythe est, depuis, revu et corrigé par les historiens, en un travail qui, loin d'annuler la singularité de Léonard, au contraire, la cerne.

Remis dans son époque par Bertrand Gille, Léonard apparaît d'abord très entouré. Des ingénieurs, il y en a d'autres, qui le précèdent ou l'accompagnent, et dont les talents sont au moins égaux, voire supérieurs aux siens. Comme lui, ils sont polytechniciens, ce qui dans le *Quattrocento* italien, signifie qu'ils maîtrisent toutes les techniques où entre le dessin : la peinture, la sculpture, l'architecture, la conception et la construction de machines pour les chantiers ou la guerre. Citons ici Brunelleschi. Outre la formalisation de la perspective, cruciale dans l'œuvre de Léonard, il a à son actif la réalisation d'une prouesse architecturale : la construction, en un temps record, de la coupole de la cathédrale de Florence et des machines de levage qui la permirent.

Être polytechnicien, au sens qu'on vient de donner à ce mot, est d'ailleurs à cette époque une nécessité sociale. C'est la condition pour trouver un emploi auprès des princes qui, de Milan à Rome, rivalisent dans une course à la puissance politique et au prestige artistique. Deux domaines les intéressent particulièrement : le génie militaire et l'hydraulique. Léonard s'y consacrera, à Milan, au service de Ludovic le More, à partir de 1482.

Invente-t-il vraiment? Oui et non. Les Carnets d'alors montrent certes des projets, notamment une grande statue équestre qui ne verra jamais le jour, mais le plus souvent entourés de nombreux croquis de machines déjà existantes, commentées et parfois améliorées, sans que, selon la tradition du Moyen Âge, les sources soient citées... Exit donc la figure du génie isolé.

La stature de Léonard s'en trouve-t-elle réduite? Sans doute pas. Seulement transformée. Les travaux des historiens actuels tendent en effet à associer une figure nouvelle à celle, toujours immense, de l'artiste. Ils font de Léonard l'inventeur, non pas tant de machines extraordinaires appelées à rester des "machines de pensée", que d'un regard entièrement neuf sur la nature et ses objets. Ils en datent l'émergence à la deuxième moitié de sa vie, lorsque, peignant de moins en moins, il consacre l'essentiel de son temps à étudier les mathématiques, l'anatomie et la mécanique, la science du mouvement. Ce regard, nous le lirons, cherche à fonder la géométrie de toute forme – articulation, ailes d'oiseau, tourbillons, machines, etc. – sur les lois universelles de la mécanique. En bref, assigner la contingence d'une forme et de ses variations à la dynamique qui la sous-tend.

Ce changement conceptuel conduit Léonard à définir une stratégie entièrement nouvelle dans la représentation perspective des objets : vues sous plusieurs angles, éclatés, schématisations géométriques. C'est ainsi qu'il fonde le dessin technique, celui-là même des ingénieurs d'aujourd'hui.

Comme l'écrit le professeur Paolo Galluzzi dans son introduction au catalogue de l'exposition, *Léonard de Vinci et les Ingénieurs de la Renaissance* : *"Toute l'œuvre graphique de Léonard laisse transparaître une même volonté : utiliser le dessin comme un instrument permettant de présenter les créations de la nature non selon les apparences sensibles, mais en tant qu'expressions nécessaires de l'action des lois universelles qui la gouvernent."*

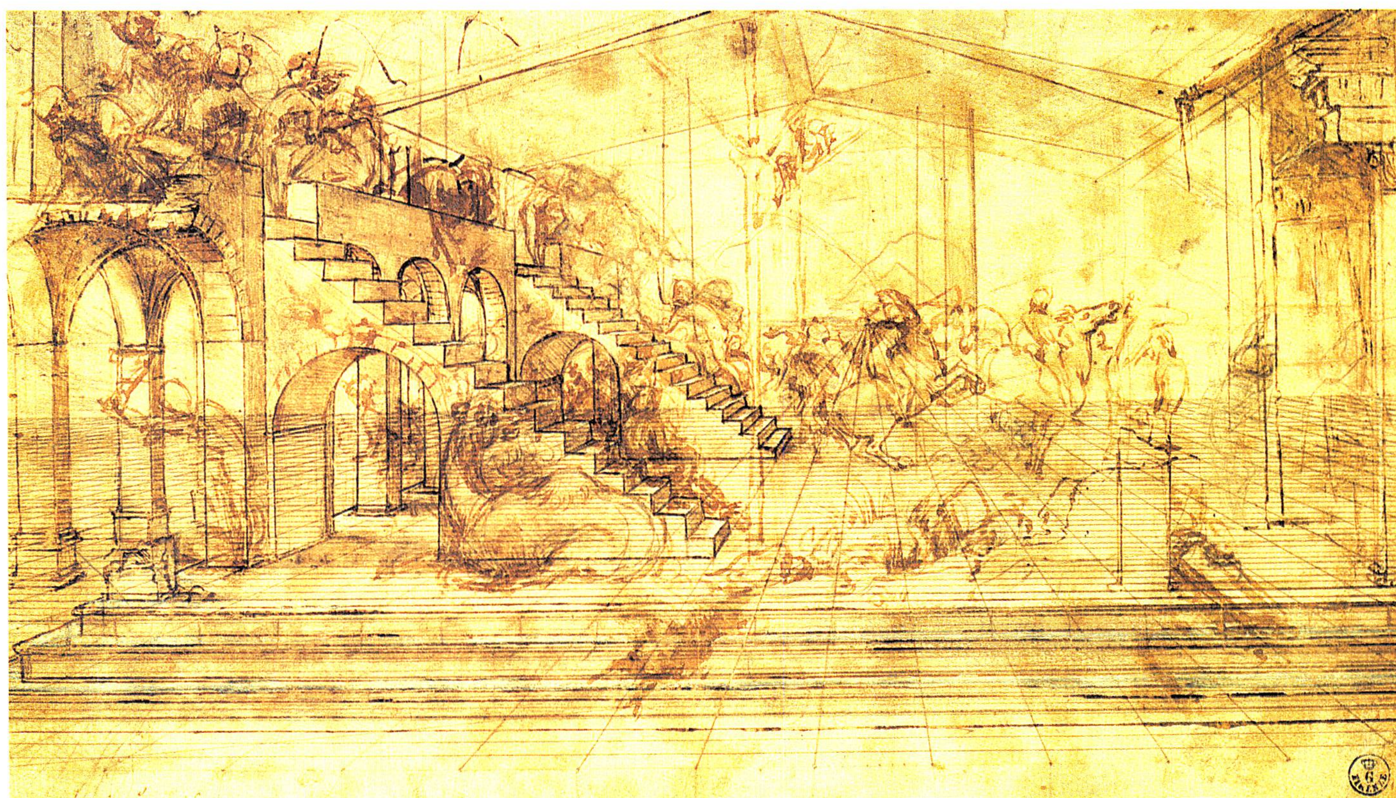
Illustrons ce propos par la description que Léonard donne, dans ses Carnets, de l'organisation du feuillage d'un orme : *"Du point de départ d'une feuille à l'autre, il y a la moitié de la plus grande longueur de la feuille - un peu moins, car les feuilles forment un intervalle qui représente environ le tiers de leur largeur (...) Ces feuilles, disposées sur l'arbuste de manière à se recouvrir le moins possible, alternent l'une au-dessus de l'autre, comme le lierre qui tapisse les murs. Cette alternance se propose deux fins : ménager des intervalles pour que l'air et le soleil puisse passer entre eux - et secondement, permettre aux gouttes tombant de la première feuille d'arriver à la quatrième, ou la sixième, quand il s'agit d'autres essences."*

Si ce n'est un dessin, c'en est le principe organisateur. Si un peintre veut être le maître du juste trait, il lui faut comprendre les forces cachées qui président à l'ordre des choses.

J-P I

LÉONARD DE VINCI

En *mars 1481, commande est faite à Léonard d'une* Adoration des Rois Mages. *Ce tableau, destiné à un couvent des environs de Florence, dépassera le stade d'étude (ci-dessous). Mais il ne sera jamais achevé.*



ARTEPHOT - NIMATALLAH - MUSEE DES OFFICES, FLORENCE

PHOTOS DE COUVERTURE : Explorer Archives - Bibliothèque de Turin et Musée d'histoire des sciences de Florence

PRIX NORMAL D'ABONNEMENT AUX CAHIERS DE SCIENCE & VIE PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 6 CAHIERS S & VIE : 413 FF MAXI PANORAMA (1 AN) : 12 NUMEROS + 4 HORS SERIE + 6 CAHIERS S & VIE : 488 FF

CANADA et **U.S.A**, PERIODICA INC. CP 444OUTRE-MONT, Québec, CANADA H2V 4R6; **SUISSE**, NAVILLE Case Postale 1211, GENEVE 1- SUISSE; EN **BELGIQUE,** PRESSE ABONNEMENT 90 BD DU SOUVERAIN 1170 BRUXELLES, TARIFS ET AUTRES PAYS NOUS CONSULTER.

PUBLIE PAR EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A. 1, RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS. CEDEX 15 - TEL : 46.48.48.48 **EXCELSIOR PUBLICATIONS S.A.** CAPITAL SOCIAL : 11 100 000 F - DUREE 99 ANS **PRINCIPAUX ASSOCIES :** YVELINE DUPUY, PAUL DUPUY.

DIRECTION ET ADMINISTRATION : PRESIDENT-DIRECTEUR GENERAL : PAUL DUPUY, DIRECTEUR GENERAL : JEAN-PIERRE BEAUVALET, DIRECTEUR GENERAL ADJOINT : FRANCOIS FAHYS, DIRECTEUR FINANCIER : JACQUES BEHAR, DIRECTEUR COMMERCIAL PUBLICITE : GILLES BECDELIEVRE, DIRECTEUR MARKETING ET COMMERCIAL : MARIE-HELENE ARBUS, DIRECTEURS MARKETING ET COMMERCIAL ADJOINTS : JEAN- CHARLES GUERAULT ET PATRICK-ALEXANDRE SARRADEIL, DIRECTEUR DES ETUDES : ROGER GOLDBERGER, DIRECTEUR DE LA FABRICATION : PASCAL REMY.

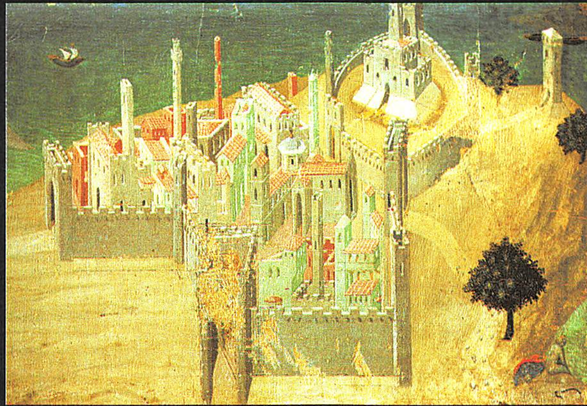
COMITE DE REDACTION : PHILIPPE COUSIN, BRUNO LATOUR, ANTOINE PICON, MICHEL SERRES, ISABELLE STENGERS.

REDACTION : JEAN-PIERRE ICIKOVICS (REDACTEUR EN CHEF), ANNE LEFEVRE (REDACTRICE EN CHEF ADJOINTE), PATRICIA CHAIROPOULOS, ALICE ROLLAND, CLAUDE REYRAUD (RÉDACTEURS), NAJAT NEHME (SECRETAIRE DE REDACTION), ALINE HOUILLON (SECRETAIRE), STEPHANIE DE MAREUIL (ICONOGRAPHE), DENIS MALARTRE (1er MAQUETTISTE), MICHEL SOUDAY (MAQUETTISTE), MONIQUE VOGT (SERVICE DES LECTEURS).

SERVICES COMMERCIAUX : RELATIONS EXTERIEURES : MICHELE HILLING ASSISTEE DE BLANDINE DEVRIENDT, ABONNEMENTS : PATRICK SARRADEIL, COMMANDES D'ANCIENS NUMEROS ET RELIURES : CHANTAL POIRIER TEL : 46.48.47.18, RELATIONS CLIENTELES ABONNES : PAR TELEPHONE (1) 46.48.47.08 OU 47.11, PAR COURRIER : SERVICE DES ABONNEMENTS : 1 RUE DU COLONEL PIERRE AVIA 75503 PARIS CEDEX 15, CHEF DE PRODUIT MARKETING : CAPUCINE JAHAN TEL. : 46.48.47.30; VENTE AU NUMERO : JEAN-CHARLES GUERAULT, ASSISTÉ DE CATHERINE LOUIS TÉL : 46.48.47. 40; REASSORTS ET MODIFICATIONS : TERMINAL E 91 TEL. VERT : 05.43.42.08 (RESERVE AUX DEPOSITAIRES DE PRESSE). PUBLICITE : VERONIQUE MOULIN EXCELSIOR-PUBLICITE, INTERDECO 27, 23, RUE DE BAUDIN - 92300 LEVALLOIS-PERRET TEL : 41.34.80.00

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : PAUL DUPUY - DÉPÔT LÉGAL : N° 84007 - N° DE COMMISSION PARITAIRE : 57284 DU 15 DÉCEMBRE 1975 PHOTOGRAVURE : FLASH IMAGE - IMPRESSION : IMPRIMERIE SEREGNI, MILAN - PRINTED IN ITALY

ET AVANT



Dans le haut Moyen Age, à Milan comme à Sienne, des princes en quête d'une consécration font preuve de libéralité. La bourgeoisie urbaine n'est pas en reste : elle sait accompagner la ferveur des donateurs, pour le salut des âmes, comme pour la gloire des villes. Ainsi démarrent de grands chantiers. De ceux qui résistent à l'usure du temps. Les cathédrales qu'ils édifient témoignent d'un savoir-faire exceptionnel dans la conception, l'organisation et le contrôle de la construction. Mais leurs maîtres d'œuvre restent bien souvent anonymes.

Grands chantiers et hommes de l'art

Le nom de quelques fameux commanditaires – tel l'abbé Suger pour l'abbaye de Saint-Denis – ou de quelques maîtres d'œuvre – Jean de Chelles à Notre-Dame de Paris, ou Pierre de Montreuil à la Sainte-Chapelle de Paris – sont demeurés à la postérité. Mais on serait bien en peine d'exposer, à partir de sources documentaires fiables, l'organisation et l'avancement des chantiers de monuments majeurs de l'art gothique français. La situation serait à peine meilleure dans les pays voisins de la France, où sont conservés des fragments de comptabilité.

L'histoire des bâtiments civils et de leur construction n'est pas plus facile à retracer dans le détail. Les premiers comptes royaux français [1], tout

1 – Ils datent du règne de Philippe-Auguste.

Sur la réalisation des grands chantiers médiévaux, la documentation est extrêmement pauvre. D'où l'intérêt des miniatures d'époque (Jean Fouquet, Construction du Temple de Jerusalem)

Seules quelques églises médiévales se racontent par leurs propres archives : à Sienne, Orvieto, Florence ou Milan, par exemple. Elles nous permettent de reconstituer un grand chantier du XIVe siècle : une société hiérarchisée, aux tâches rationalisées, et où se concentrent les talents. Leurs maîtres d'œuvre sont à la fois sculpteurs, peintres, décorateurs...

PAR PHILIPPE BRAUNSTEIN

Quelle que soit l'époque considérée, il n'est pas de grande entreprise inscrite dans l'espace qui n'ait fait l'objet d'un projet et d'une gestion maîtrisés. Assèchement ou régulation des eaux, exploitations minières, carrières et fonderies, bassins et quais de ports antiques ou médiévaux, ponts et aqueducs, murailles et fortifications... On pourrait multiplier les exemples de travaux d'envergure dont la marque est inscrite, pour des siècles, dans la structure des paysages.

Des palais de Babylone aux cathédrales d'Occident, de grands édifices de prestige et de dévotion ont résisté à l'usure du temps et aux destructions. Ce qui s'explique quand on sait qu'ils représentent non seulement une accumulation stupéfiante de matériaux, mais aussi un savoir-faire exceptionnel dans la conception, l'organisation et le contrôle de leur construction.

Sur la gestion des grands chantiers, la documentation demeure nulle ou extrêmement lacunaire jusqu'à la fin du XIVe siècle. Pour la célèbre cathédrale de Chartres, comme pour la plupart des grandes églises d'Ile-de-France, c'est le monument en lui-même qui permet de reconstituer les phases de la construction. Au prix d'un effort renouvelé d'analyse interprétative, on peut reconstituer les méthodes de mise en œuvre des matériaux, voire suggérer le rôle des équipes au travail.



Auid en ainsi de quan
tes vertus et de quants
biens il a este aucteur
a ceulx de sa lignee. et

uir devant dit. Quand salom
son filz ancores jeune enfant eut
prins le royaume de son pere. et fu
assis ou siege royal. tout le peuple

comme ceux de la construction des châteaux anglais du XII[e] siècle, renseignent sur l'ampleur des fonds affectés. Ils permettent également de connaître les transferts de main d'œuvre réquisitionnée. Mais ils demeurent allusifs sur l'organisation du travail.

Il faut attendre le milieu, voire le dernier tiers du XIV[e] siècle, pour que, dans la masse d'archives publiques, privées et institutionnelles, des délibérations et documents comptables viennent conforter la connaissance que l'on peut avoir de monuments subsistants, défigurés ou disparus.

La documentation écrite est la seule à pouvoir offrir des possibilités d'analyse économique, technique et sociale du travail sur les chantiers. A cet égard, les conseils de Fabrique, responsables de l'entretien des bâtiments ecclésiastiques, ont transmis une multitude d'informations. Mais il est rare que la documentation médiévale ait subsisté dès l'origine des travaux. C'est le cas de quelques grandes églises d'Italie : les cathédrales de Sienne, d'Orvieto, de Florence, et de Milan peuvent être étudiées à la lumière de leurs propres archives. Grâce à elles, nous pouvons retrouver la pratique quotidienne de grandes entreprises, qu'il s'agisse de la maîtrise de l'espace, de la gestion du personnel, ou de la responsabilité des choix créatifs.

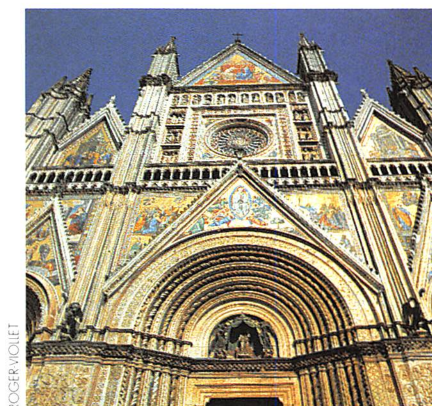
La comptabilité au jour le jour a sans doute ses limites : on ne peut lui demander de peindre les cheminements de la création. Elle montre toutefois, à sa manière, comment une entreprise politique, spirituelle, et symbolique se construit avec des briques, des pierres, du mortier et du fer. Les acteurs y apparaissent, au fil des mentions comptables, saisis dans leurs devoirs et leurs gestes, et certains d'entre eux acquièrent, dans la durée, une épaisseur.

Les registres comptables sont parfois accompagnés de délibérations du conseil de Fabrique, qui mettent l'action des maîtres en perspective. Cela permet de mieux comprendre les attendus d'une décision. Enfin, les procès-verbaux de discussions d'experts ont quelquefois été conservés : on est alors mieux renseigné sur les hésitations et les choix des commanditaires et des maîtres d'œuvre qu'on ne le serait sur un chantier de notre époque !

C'est donc à partir de l'étude de cas particulièrement éclairants que l'on peut tenter de se représenter l'« idéal-type » d'un grand chantier médiéval. La tonalité italienne y domine, assurant le lien avec la construction des grands édifices de la Renaissance. Entre la fin du XIV[e] et le milieu du XVI[e] siècle, les modalités de l'apprentissage, les techniques mises en œuvre, l'approvisionnement en matières premières, et les conditions de travail ne connaissent pas d'évolution sensible. Ce qui change, en revanche, c'est la place qu'occupe le concepteur du projet et organisateur du chantier – on l'appellera architecte – par rapport au commanditaire ainsi qu'à l'ensemble du personnel.


ROGER VIOLLET

Seules quelques grandes églises italiennes, comme celles de Sienne (ci-dessus) et d'Orvieto (ci-dessous), possèdent des archives remontant à l'origine de leur construction. Grâce à elles, on peut tenter de se représenter l'« idéal-type » d'un grand chantier médiéval.


ROGER VIOLLET

Choisissons le cas le plus complexe : celui d'un édifice religieux construit au cœur d'une grande ville. Avant même les premiers travaux, se pose le problème de la coexistence, dans une zone densément peuplée, d'un chantier d'envergure et d'une structure urbaine. Un chantier de construction, en effet, est d'abord un chantier de démolition. Avant de procéder aux alignements et destructions nécessaires, le maître d'œuvre doit donc être en mesure d'acquérir des terrains bâtis au plus bas prix, ou de faire adopter par la puissance publique des procédures d'expropriation.

Une fois le sol acquis, le maître d'œuvre doit prévoir, pour une longue durée, un approvisionnement en matériaux de construction. Il lui faut d'abord penser au cheminement des chars et charrettes, depuis la voie d'eau la plus proche du chantier. Il doit ensuite s'assurer des possibilités de stockage sur place. Enfin, il faut creuser des fosses profondes pour l'établissement des fondations. Ainsi, à Milan, on descendit à sept ou huit mètres de profondeur pour atteindre le roc. Il fallut passer contrat avec des transporteurs chargés d'évacuer la terre et les matériaux de démolition non récupérables : simultanément, les éléments d'architecture souterraine mis à jour par la fouille étaient mis de côté, pour être réemployés.

Dans les premiers temps d'un chantier d'envergure, de nombreuses équipes de terrassiers sont employées.

Il faut les nourrir et les loger. Un grand chantier de construction urbain, on le voit, suppose une organisation aussi complexe au XIVe siècle que de nos jours. Il ne peut fonctionner sans une vision rationnelle, à long ou moyen terme, des missions et des moyens.

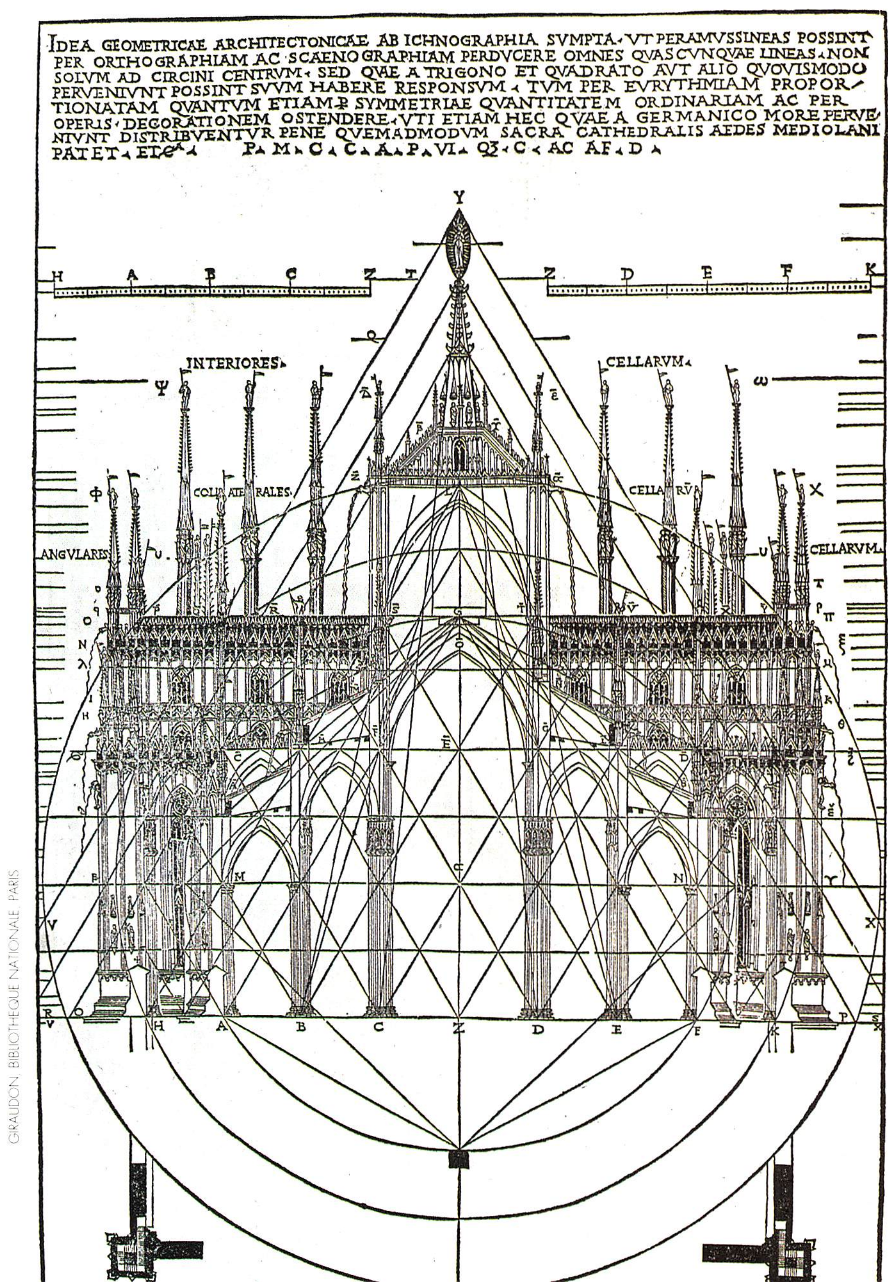
Il serait hors de question d'entreprendre la construction d'une cathédrale sans s'assurer le financement du gros œuvre. Pour des raisons financières, nombre d'églises, commencées avec espoir, ont connu un ralentissement ou un arrêt des travaux. Néanmoins, dans l'ensemble, les programmes les plus ambitieux supposaient la proclamation d'un jubilé, ou une campagne incitative de prédications pour faire affluer les dons des fidèles.

Les princes firent preuve de libéralité : ce fut le cas de Philippe Auguste à Amiens, de Charles IV à Prague, et de Giangaleazzo Visconti à Milan. Enfin, des membres éminents de l'aristocratie des affaires figurant dans le conseil de Fabrique, la bourgeoisie urbaine sut accompagner la ferveur des donateurs, contribuant, pour son compte, à la gloire des villes et au salut des âmes, tout en construisant un système efficace de financement des travaux.

De tous les comptes conservés dans les archives des Fabriques, ceux de Milan brillent par leur qualité supérieure. De fait, au début du chantier, le fondateur de la banque del Mayno occupait le poste de trésorier général de la Fabrique, tandis que le responsable de la comptabilité ducale, Beltramolo di Conago, était chargé des dépenses. Dans cette ville, les opérateurs économiques et techniciens des affaires qui supervisaient la marche de



ROGER-VIOLLET



GIRAUDON. BIBLIOTHEQUE NATIONALE. PARIS

Fondé en 1386 à l'initiative de l'évêque Antonio da Saluzzo, le Dôme de Milan est l'édifice gothique le plus complexe d'Italie. Sa construction s'étala sur plusieurs siècles, nécessitant la venue d'une multitude de maîtres d'œuvre et d'architectes, de sculpteurs et de verriers.

l'entreprise avaient acquis une avance sur toutes les autres places commerciales de l'Europe dans la comptabilité à partie double.

Pour ne pas être submergé par les dons en nature (des poules, des pièces de drap, des bijoux) et par de menues monnaies de toute provenance, le conseil de Fabrique dut organiser régulièrement des ventes aux enchères. Il fit convertir en unités de compte, gagées sur des espèces ou des titres, les biens meubles ou immeubles offerts à l'église. Les salaires représentant près de 40 % de l'ensemble des dépenses, il fallait que fussent sans cesse disponibles, de semaine en semaine, les sommes nécessaires au paiement des ouvriers.

Entre les dons et legs – qui représentent l'essentiel des entrées – et le paiement des fournitures, transporteurs, et salariés du chantier, une comptabilité systématique est l'atout essentiel d'un grand chantier. Le système de gestion milanais est beaucoup plus élaboré que celui, contemporain, du chantier de la cathédrale de Prague, où des deux *rectores fabricae*, l'un est chargé des finances, et l'autre, des travaux.

A Milan, un règlement général d'administration, daté de 1387, définit, une fois pour toutes, postes et fonctions des responsables du chantier, dont la situation est aussitôt transcrite dans le langage de la comptabilité à partie double. Tout mouvement de fonds et de marchandises y est affecté, en deux comptes distincts, des signes « doit » et « avoir » pour les personnes comme pour les biens. De plus, la trésorerie est totalement distincte de la comptabilité. Ainsi, tout mouvement de fonds suppose mandat de paiement, et le comptable n'est jamais ni payeur ni receveur.

Ces principes manifestent à la fois l'avance technique et la clairvoyance économique des dirigeants du Conseil, qui créent un organe de décision et de contrôle permanent des travaux et font de la Fabrique une personne morale. On compte ainsi quatre agents d'exécution, responsables devant le Conseil : le trésorier général, le comptable en chef, le dépensier et le chef de maintenance. Le premier enregistre les mouvements de caisse ; le second rédige et vise les mandats de paiement inscrits au crédit du payeur ; le troisième verse les salaires, règle les achats ou consent des avances aux fournisseurs ; le dernier tient à jour l'état des magasins.

Il faut enfin une direction conceptuelle et technique des travaux : elle est confiée, en 1387, à un maître maçon, Simone de Orsenigo, nommé « ingénieur général de la Fabrique ». Comme les administrateurs, il est payé par un salaire mensuel. Ce qui l'élève au-dessus des autres maîtres du chantier, payés à la journée de travail. Nous reviendrons plus loin sur le rôle et la fonction de celui, qu'à Milan, on appelle l'ingénieur général.

Organiser un grand chantier, c'est s'assurer la provenance et l'acheminement des matériaux de construction, qui représentent, avec les frais de transport, 40 à 50 % des dépenses prévisibles. Il faut évidemment pouvoir disposer au meilleur prix d'une source d'approvisionnement régulière. On connaît les lieux d'extraction et les qualités de pierre de tous les grands édifices du Moyen Âge européen. Le liais du sous-sol parisien, on le sait, a été utilisé pour les parties nobles de Notre-Dame de Paris. Les carrières de Berchères, à quinze kilomètres de Chartres, ont, quant à elles, procuré les pierres de la cathédrale : il faut se représenter le rythme des approvisionnements à l'allure d'une paire de bœufs faisant un aller-retour par jour pour transporter un mètre cube ! A Milan, la pierre et le marbre ont été fournis par un chantier satellite du Dôme en construction, près de Domo d'Ossola, à une soixantaine de kilomètres de la ville.

Par ce dernier exemple, on peut éclairer le souci de rationalisation du travail sur un grand chantier médiéval. La comptabilité fait apparaître la normalisation des procédures de taille à la carrière, déjà mise en évidence sur des chantiers du nord et de l'est du bassin Parisien, au tout début du XIII[e] siècle. On a même pu parler d'une révolution technique, dans la mesure où les assises, constituées de blocs taillés au gabarit, étaient montées sans retouches. Ces assises, nommées « corsi », furent produites en série et modulées selon des dimensions et des profils définis d'avance, y compris pour des éléments décoratifs. On conçoit l'incidence de cette normalisation sur l'organisation du chantier, et la place acquise par un nouveau métier, celui d'appareilleur.

Le Conseil était également soucieux de régler les flux. Les distances entre le chantier et la carrière imposant la voie fluviale, la Fabrique du Dôme devint, en plein accord avec le duc et la commune, un partenaire essentiel de l'aménagement du territoire. Des travaux considérables furent entrepris pour régulariser le cours du Tessin, aménager les canaux au plus près du chantier urbain, créer des écluses, installer des appareils de levage aux points de rupture de charge. Des accords furent ensuite conclus avec des transporteurs accrédités et associés au plan de rotation des barges. En toute saison, celui-ci commandait le rapport entre la taille en amont et la pose en aval, et par conséquent, l'embauche journalière.

Outre la pierre et le marbre, tout grand chantier fonctionnait comme un centre d'appel pour de nombreux matériaux de base. Il fallait se procurer la chaux, le sable nécessaire au mortier, le fer en barres ou en lames pour forger les pics et les bêches, l'acier pour donner tranchant et pointe aux outils des tailleurs de pierre, mais aussi les claveaux, les tirants utilisés dans la construction, et l'infinie variété



ROGER-VIOLLET, GALERIE FRANCHETTI, VENISE

Tout grand chantier nécessite des matériaux de base : pierre, marbre, chaux, sable... Il revient au maître d'œuvre d'en prévoir l'approvisionnement, l'acheminement et le stockage.

de clous pour les échelles, les caisses, les coffrages, les échafaudages. A Milan, la brique est par ailleurs utilisée dans les fondations et le remplage (2) en centaines de milliers d'unités.

Pour tous ces matériaux, le Conseil de Fabrique passait des contrats sur avances avec les fournisseurs et transporteurs. Les partenaires devaient alors s'engager à respecter les délais établis par les équipes hebdomadaires pour livrer leurs matériaux. Des fours et des forges s'établirent à la périphérie de la ville ou dans des bourgs voisins. Un véritable paysage industriel, né des activités de construction ou renforcé par l'existence du chantier, attire ou maintient une main-d'œuvre à des kilomètres à la ronde.

Lorsqu'on possède, grâce à la comptabilité, des listes de salariés d'un grand chantier, on constate à quel point la ville attire des demandeurs d'emplois de tout niveau.

Les premiers temps, ceux du terrassement et des déblais, donnent du travail à des équipes qui se constituent derrière un maître qui les recrute et les dirige. Ils offrent leurs services en petites unités, souvent originaires d'un même village. Suivant la masse de travaux préparatoires et de tâches urgentes à accomplir (par exemple la réalisation d'échafaudages), les effectifs sont très variables d'une semaine, voire, d'un jour à l'autre.

Les métiers entrent ensuite en scène. Ils reflètent les étapes nécessaires de la construction. Viennent d'abord les maçons, tailleurs de pierre et appareilleurs, puis les sculpteurs et décorateurs. Les forgerons et charpentiers, avec de faibles variations de personnel, forment, quant à eux, la base continue de l'entreprise.

Le chantier ne s'interrompt pas en hiver. Durant cette période, dans la chambre à tracer et dans la loge, des projets sont conçus, des sculptures dessinées puis réalisées. Le chantier ne s'arrête pas davantage en été, malgré les fenaisons, les moissons et les vendanges. Les embauches d'appoint n'ont plus de raison d'être lorsque seuls les techniciens et leurs compagnons sont en scène, et l'on revient de plus d'une centaine à moins d'une cinquantaine de travailleurs.

Les entreprises du bâtiment sont probablement celles où l'appel aux capacités favorise les réputations flatteuses d'étrangers à la ville. Ainsi, les maîtres maçons lombards voient leur renommée les précéder sur tous les chantiers d'Italie, tandis que les experts français ou allemands sont sollicités dans toute l'Europe.

Centres d'appel, de promotion, et de distinction, les grands chantiers – et

2 – En construction, ce terme désigne un mélange de briques et de mortier dont on remplit l'espace entre les deux parements d'un mur.

particulièrement ceux des églises – échappent aux règles contraignantes des organisations de métiers. Ils n'en créent pas moins une société rigoureusement hiérarchisée, que révèle l'échelle des salaires et rémunérations. Quand, à la fin du XIVe siècle, un travailleur de base gagne trois sous par jour, un compagnon en gagne cinq, un maître charpentier, sept, et un maître maçon, neuf à dix. Quant au personnel d'encadrement, qu'il s'agisse de la direction technique ou de la direction administrative, il n'est pas rémunéré à la journée, mais au mois, avec un contrat d'engagement annuel. En outre, il n'est pas payé en monnaie courante, mais en or.

Le souci d'encadrement de la main d'œuvre salariée vise surtout le rendement. La défiance s'évalue au contrôle étroit du temps de travail. Sur le chantier, on le mesure par une clepsydre à sable ou à eau : cela permet de soustraire du salaire dû le temps passé à attendre que la pluie cesse... A partir du début du XVe siècle, souvent, une horloge mécanique sonne les heures. Elle donne le signal du début et de la fin du travail. Personne n'échappe à ces contrôles, pas même les maîtres étrangers recrutés à grands frais : on leur décompte quelques sous pour retard, ou on les fait passer de la condition d'ingénieur à celle de maître maçon pour n'avoir pas su remplir la mission confiée...

Il n'en est pas moins vrai que les conseils de Fabrique veillent à favoriser la promotion des talents. La stricte hiérarchie des salaires, de même que la distinction fondamentale entre le monde des travailleurs et celui des gestionnaires, s'accordent avec le souci de reconnaissance des capacités. C'est ainsi, nous l'avons vu plus haut, qu'un maître maçon milanais, Simone de Orsenigo, a été promu, en 1387, ingénieur général du chantier : payé dix sous par jour à la tête de son équipe, il perçoit alors, par contrat annuel, un salaire mensuel de dix florins or. Rapporté à un mois de vingt-cinq jours, ce salaire lui assure un minimum théorique de douze sous par jour, mais surtout, cela le hausse du côté des décideurs.

Comme le précise la comptabilité, Simone de Orsenigo reçoit des peaux de parchemin et de la teinture rouge pour dessiner plans et élévations du dôme. Ce travailleur manuel, qui est peut-être à la loge du chantier un maître enseignant les apprentis, a le don de voir dans l'espace, la capacité d'exposer ses vues et de les défendre devant le Conseil de Fabrique. Il a sans doute aussi une autorité naturelle sur les compagnons et les maîtres du chantier. Pourtant, mission accomplie, et sans qu'il n'ait en rien démérité, il se retrouve, au bout d'un an, dans sa position première, avec son salaire à la journée. La direction de l'entreprise n'a cessé d'allier dureté et flexibilité, jouant à la fois sur la surveillance, la concurrence et la promotion.

L'« idéal-type » du grand chantier est un lieu où se concentrent les talents. Bien avant Léonard de Vinci, demeuré le témoin exemplaire d'une virtuosité à tout entreprendre, on rencontre des créateurs formés à la connaissance d'un matériau. Les uns sont des charpentiers, devenus maîtres de machines, les autres des tailleurs de pierre, qui se sont faits sculpteurs. Cette maîtrise des matériaux conduit à la domination de l'espace, des volumes, des valeurs et des forces. Les plus brillants peuvent passer d'un matériau à l'autre. Ils sont capables de dessiner, de projeter, de concevoir plans de masse et détails décoratifs. *Ars et ingenium*, c'est par ces deux mots que l'on rend le plus bel hommage au talent des maîtres. Un talent fait de savoir-faire hérité et d'une intelligence créatrice qui connaît les règles et les transcende.

Ainsi, sur le chantier de Milan, Giovanni de Grassi apparaît comme ingénieur, c'est-à-dire directeur technique, mais aussi comme sculpteur. On lui réserve un bloc de marbre exceptionnel, pour qu'il y sculpte *Le Christ et la Madeleine*. Mais il peint également des toiles, décore des portes de la sacristie, ou bien dessine des chapiteaux et verrières...

Dès la fin du XIVe siècle, les conseils de Fabrique cherchent à conserver, en lieu sûr, les dessins et modèles laissés par les maîtres. Ils souhaitent également que le chantier soit une école permanente, où les talents se développent par l'étude et l'imitation. Quand les métiers urbains ont tendance à se refermer sur eux-mêmes et à encourager la cooptation, ils encouragent, pour leur part, le recrutement de jeunes gens doués.

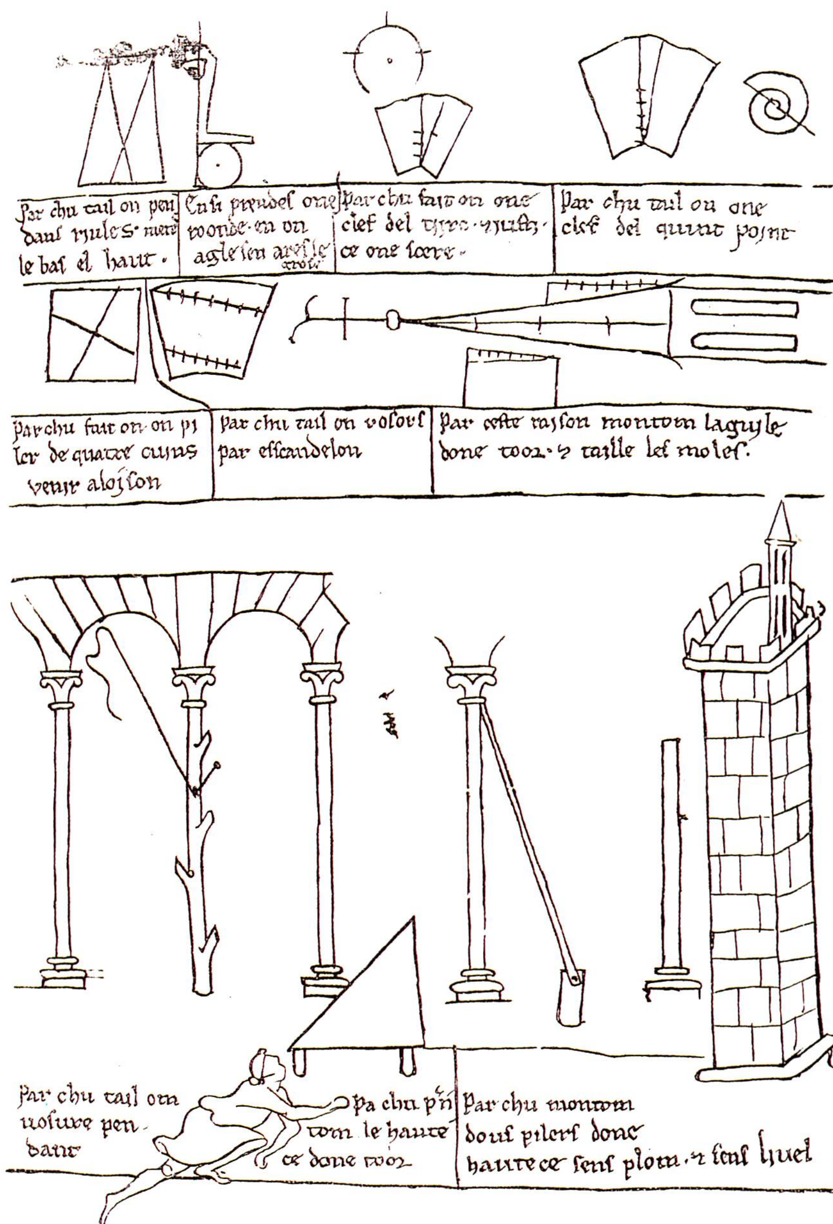
Le registre du chantier de Prague, qui date du milieu du XIVe siècle, montre la présence de compagnons venus de toute l'Europe pour se former auprès de maîtres réputés, tels les membres de la dynastie des Parler. Durant leur formation, dans le milieu dont sont issus ceux qu'on appellera plus tard les architectes, les praticiens n'ont pas le temps d'acquérir des connaissances théoriques. C'est sur les chantiers, vers l'âge de 12-14 ans, qu'ils s'initient à la géométrie par le compas et l'équerre. Un maçon se forme ainsi en trois ans, et un tailleur de pierre en cinq ans.

Le projet n'est cependant le fait que d'un petit nombre, ceux chez qui les maîtres décèlent la *subtilitas ingenii*, des dons de finesse et d'invention. Pour passer du compagnonnage à la maîtrise, il leur faut encore plusieurs années d'apprentissage de l'art. Ils doivent se familiariser avec tous les types de monuments et de machines, comme avec tous les aspects de la décoration sculptée (gables, pinacles, statues).

Sur la vie des praticiens de la construction, à la loge, à l'atelier, à la chambre aux traits, les témoignages – hors des comptes – ne se multiplient qu'à l'époque moderne. Du Moyen Age n'ont subsisté que des collections d'admirables dessins – tels ceux que conserve le Musée de l'Œuvre de Strasbourg – ou des fragments de carnets d'étude, dont le plus fameux est celui de Villard de Honnecourt.

Ce dernier carnet couvre une dizaine d'années, entre 1230 et 1240 (3). Tout à la fois recueil de modèles de provenances diverses, de croquis d'après nature, d'engins de chantiers, de « portraitures » dans lesquelles entrent des

3 – Ce carnet de croquis, conservé à la Bibliothèque nationale de Paris (Ms. fr. 19093), comporte des ajouts jusqu'au XVe siècle.



JL CHARMET

Le carnet de Villard de Honnecourt abonde de croquis consignés entre 1230 et 1240. On y trouve des plans de machines ou de constructions, des dessins de scènes de combat, d'animaux...


G. DAGLI ORTI, HOPITAL SANTA MARIA DELLA SCALA, MILAN

Chaque chantier voit affluer une main d'œuvre abondante : maçons, tailleurs de pierre, appareilleurs, sculpteurs, décorateurs... Les salaires représentent 40% des dépenses globales.

éléments sculptés et décorés, il illustre l'ampleur du champ d'intervention du bâtisseur. Le maître y a consigné des éléments accumulés de son savoir et de son enseignement.

Ces recueils de figures et d'expériences, que l'on se transmettait dans le cadre de la « bottega » (4), posent la question des rapports entre science et pratique. D'après les discussions d'experts, conservées pour certains chantiers, et si l'on s'en réfère aux premiers manuels de géométrie appliquée à la construction, on peut supposer que le bagage mathématique des maîtres excluait démonstrations et calculs. Il se limitait sans doute à des formules visualisées, utilisées comme des recettes. Aujourd'hui encore, on en mesure l'efficacité : les élévations des églises (jusqu'à 30 et 40 mètres sous les voûtes) ont été lancées à partir d'un usage judicieux de modules, composant carrés et triangles.

Que l'on réfléchisse à l'audace avec laquelle furent montées sur les façades des cathédrales des sculptures géantes assemblées et fixées par des crampons de fer, et l'on mesure le peu d'informations dont on dispose. En dépit de l'iconographie que reconstitue le corpus des miniatures contemporaines, on connaît très mal les échafaudages et les engins de levage qui permirent la réalisation de tant de chefs-d'œuvre. Le chantier médiéval sécrète ses propres inventions, dont on n'a conservé le témoignage indirect que par les dessins de grands maîtres du XVe siècle.

De par leur origine, ces maîtres n'appartiennent pas au milieu des bâtisseurs : un notaire comme Mariano Taccola, un médecin comme Guy de Vigevano, un soldat comme Kyeser ont manifesté d'étonnantes capacités à projeter et exécuter des travaux d'intérêt public dans les domaines les plus divers, de l'hydraulique à la fonderie, de la mécanique à la fortification. Les magnifiques recueils de dessins techniques qu'ils ont constitués n'ont plus le caractère de mémorandums, comme le carnet de Villard de Honnecourt. Ils se présentent comme des encyclopédies pratiques où le texte et l'image se font écho. Leur but : transmettre la totalité d'un savoir antique revisité, réincarné par la représentation détaillée de machines dont certaines sont de simples sujets de rêveries, alors que d'autres ont été réalisées. L'ingénieur, l'architecte – le mot est prononcé – y trouvent leur compte, dans la mesure où ils ont eux-mêmes dirigé de grands chantiers.

Dès le XIIIe siècle, grâce à l'organisation technique du travail sur les chantiers, le maître d'œuvre fut libre de passer d'une entreprise à une autre sans attendre la fin des grands travaux. Deux siècles plus tard, en Italie, en Allemagne, mais aussi dans les grandes monarchies occidentales, on remarque surtout le lien personnel qui se noue entre le prince – voire le Pape – et l'homme de l'art. L'urbanisme, qui multiplie les grands chantiers, marque alors la puissance politique du souverain. Et si les bâtisseurs de cathédrales œuvraient pour le compte d'une communauté spirituelle, l'architecte de la Renaissance est le démiurge qui perpétue la mémoire des grands. ■

4 – Ce terme désignait l'atelier du maître.

LES ACTEURS HUMAINS ET NON HUMAINS



En cette période de Renaissance, on se passionne pour l'Antiquité. Tous les architectes se réclament de Vitruve, l'auteur du célèbre *De architectura*. Avec les expériences de Filippo Brunelleschi, ils découvrent par ailleurs une nouvelle technique : la perspective. Celle-ci donne lieu à de nombreux traités, lesquels peuvent être désormais plus facilement diffusés. Et ce, grâce à une autre invention majeure : l'imprimerie. Une invention qui s'épanouit à Venise, une ville de commerçants, experts en comptabilité.

VITRUVE, LE MAÎTRE ROMAIN

A l'heure où la culture et l'art européens sont en quête d'un nouveau souffle, un auteur ancien fait irruption sur la scène de l'architecture. Son traité, *De architectura*, traduit et publié, inspirera tous les ingénieurs de la Renaissance.

PAR PHILIPPE FLEURY

Nous connaissons mal la vie de Vitruve. Vers 25 avant J.-C., il publie un traité, *De architectura*, qu'il dédie à l'Empereur Auguste. C'est l'époque de l'histoire romaine de Tite Live, des *Odes* de Horace, et de l'*Enéide* de Virgile. D'illustres noms passés rapidement à la postérité. Vitruve, en revanche, connaîtra une notoriété beaucoup plus tardive.

Son activité professionnelle paraît s'être exercée dans trois domaines : construction d'édifices publics, adduction d'eau et artillerie. Et pourtant, aux dires de Vitruve lui-même, peu le connaissent. Il avoue même une certaine rancœur à l'égard de quelques-uns de ses collègues peu scrupuleux : *« Rien d'étonnant que je sois ainsi ignoré du grand nombre. Les autres architectes sollicitent et intriguent pour bâtir ; en ce qui me concerne, au contraire, je tiens de mes maîtres qu'il ne faut pas solliciter, mais attendre de l'être pour entreprendre un travail, car un homme bien né rougit de honte à présenter une demande suspecte »* (6, pr. 5). Il n'est qu'un seul monument dont il revendique explicitement la construction : la basilique de Fano, sur la côte adriatique, dont plus rien ne subsiste aujourd'hui.

Frontin, consul et curateur du service des eaux, publie un traité sur l'adduction d'eau à Rome. Il y mentionne un *Vitruvius architectus* qui, selon certains, aurait introduit, à l'époque d'Agrippa – gendre d'Auguste, 63-12 av. J.-C. –, un calibre étalon (la *quinaria*) pour les tuyaux. Tout porte à croire qu'il s'agit ici de l'auteur du *De architectura.* A cette époque en effet, Vitruve fut chargé de fonctions officielles dans le réseau d'alimentation en eau de la capitale (il y consacra partiellement le huitième livre de son traité). En outre, Auguste lui confia également *« la fourniture et l'entretien des balistes* [1]*, scorpions* [2] *et autres machines de jet »*. Vitruve faisait-il donc partie de cette catégorie d'apparitores, ces « hauts fonctionnaires » qui devaient leur rétribution à un magistrat particulier, tout en appartenant à un corps constitué, une *decuria*, susceptible de servir n'importe quel magistrat d'un certain rang ?

Quoi qu'il en soit, *De architectura* constitue le seul traité d'architecture de l'Antiquité grecque et romaine qui nous soit parvenu. Par conséquent, le manque de quelconques référents ne nous permet guère de le situer. Il semble toutefois qu'il existait, auparavant, deux types de traités : des monographies sur des constructions particulières (les ouvrages de Chersiphron et Métagénès sur le temple de Diane, à Ephèse, de Pythéos sur le temple de Minerve, à Athènes, et de Hermogènes sur le temple de Diane, à Magnésie) ; des ouvrages plus généraux sur la perspective, les proportions des temples, l'ordre dorique, l'ordre corinthien... Si Vitruve se situe dans la tradition de ce second type de traités, il possède néanmoins une originalité propre. Celle de concentrer, en un recueil unique, les sujets traités dans diverses monographies. De ce fait, et malgré une œuvre plus condensée, il s'apparente davantage à la tradition encyclopédique de Pline (Histoire Naturelle) ou de Sénèque (Questions Naturelles). Ou, plus encore, il se rapproche du livre d'architecture des *Disciplinarum libri* de Varron, ou de ceux de Fuficius et Septimius qu'il cite dans la préface du Livre VII. Mais de ces derniers ouvrages, nous ne connaissons que la seule

1 – Baliste : Machine pour lancer des pierres.
2 – Scorpion : machine pour lancer des flèches.

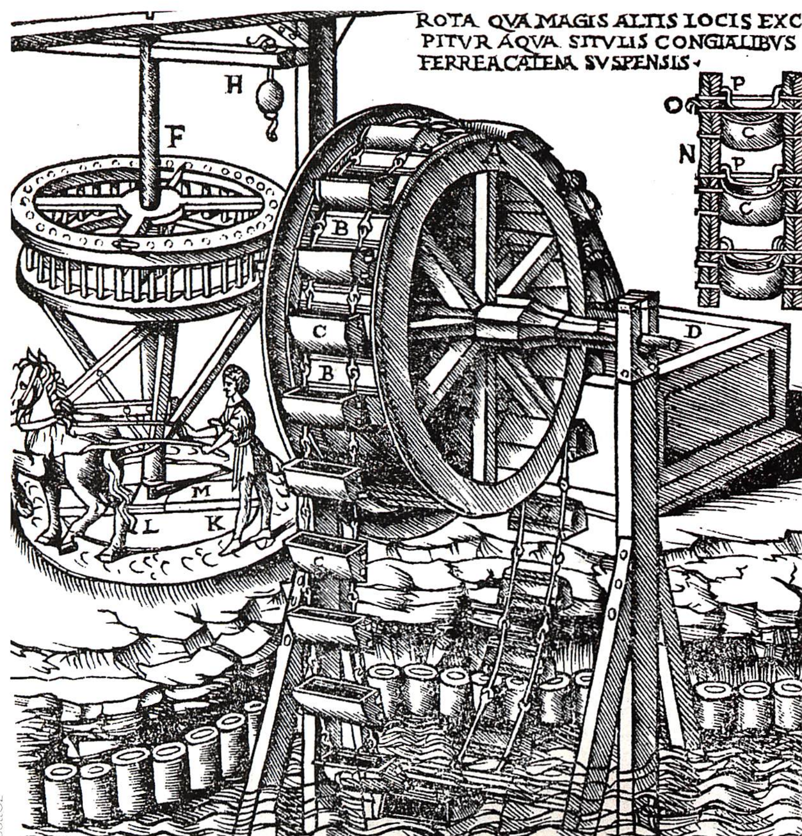
existence. Et si le traité de Vitruve n'est donc pas tout à fait inclassable, il n'en est pas moins unique pour l'Antiquité, dans l'état actuel de nos connaissances (il est en effet le seul de son genre à avoir survécu). C'est sans doute cette singularité qui, au cours des siècles à venir, va susciter l'intérêt de nombreux auteurs, architectes ou savants.

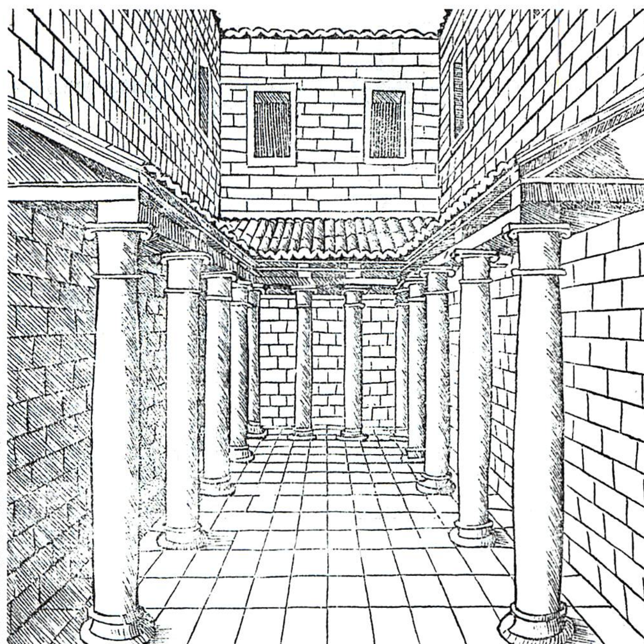
Au IIIe siècle après J.-C., *De architectura* fut abrégé par Cétius Faventinus. Deux siècles plus tard, Sidoine Apollinaire consacre Vitruve symbole de l'architecte, aux côtés d'Orphée pour la musique, d'Esculape pour la médecine, d'Archimède et de Perdrix pour la géométrie. A la fin du VIIIe siècle, Alcuin, l'abbé de Tours, fait part à Charlemagne d'anecdotes forcément puisées dans Vitruve. Au siècle suivant, Eginhard envoie à Vussin *« des mots et des noms obscurs, extraits des livres de Vitruve »*. Aux XIe et XIIe siècles, les références abondent. Théodérich, abbé de Saint-Trond à Liège dès 1099, paraphrase, en vers, le passage de Vitruve sur la Tour des vents et résume le chapitre sur les proportions du corps humain. L'abbatiale Saint-Michel, à Hildesheim, au début du XIe siècle, a probablement été réalisée par l'architecte Goderamnus, qui en fut le premier abbé. Or, celui-ci a apposé sa signature dans l'*Harleianus 2767*, le plus ancien des manuscrits de Vitruve que nous connaissions (IXe siècle). En outre, plusieurs mesures mathématiques de cette église respectent les préceptes vitruviens. Citons encore l'architecture de Cluny qui semble également s'en être inspirée. Pourtant, si tous ces exemples révèlent déjà l'influence de Vitruve, la redécouverte de l'architecte-ingénieur romain n'intervient, quant à elle, véritablement qu'à la Renaissance.

Les architectes de l'époque, eux aussi ingénieurs pour la plupart, se réclament alors clairement de Vitruve. Ils n'ignorent cependant pas les difficultés provoquées parfois par l'inadéquation des données vitruviennes aux découvertes archéologiques, ou par les obscurités ou les incohérences du texte. L'engouement pour le *De architectura* s'étend bientôt à tous les pays d'Europe, jusqu'au XVIIIe siècle. En Italie, le renouveau débute peu après la découverte, par Poggio Bracciolini, en 1414, d'un manuscrit du *De architectura* au monastère de Saint-Gall. Un Florentin, Alberti, rédige alors les dix livres de son *De re aedificatoria* en s'inspirant de son modèle latin. L'œuvre, divulguée en 1452, n'est publiée qu'en 1485, après la mort de l'auteur, et peu avant l'*Editio princeps* de Vitruve, en 1486 ; elle sera traduite en français par J. Martin, en 1553. Les Vignole, Palladio, Filarète, et autre Serlio, qui ont écrit sur l'architecture de la Renaissance italienne, ont tous lu Vitruve.

Puis, le mouvement se répand en Espagne : en 1526, le traité de Diego de Sagredo, *Medidas del Romano*, est publié à Tolède. C'est l'un des premiers commentaires de Vitruve en langue populaire, à l'usage des architectes et sculpteurs espagnols. Sa traduction française – rédigée entre 1528 et 1537, avant celle de J. Martin – paraît sous le titre : *Raison d'architecture antique, extraicte de Victruve et aultres anciens Architecteurs, nouvellement traduit d'Espaignol au Françoys, à l'utilité de ceux qui se délectent en édifices* (Paris, Simon de Collines). Si le livre de Diego de Sagredo est une adaptation, au XVIe siècle, paraissent aussi en Espagne de nombreuses traductions du

Dans le traité qu'il publie 25 ans av. J.-C., Vitruve traite d'hydraulique (ici sa roue à eau), d'hydrologie, d'urbanisme, d'architecture, de décoration, mais aussi d'ingénierie civile et militaire.





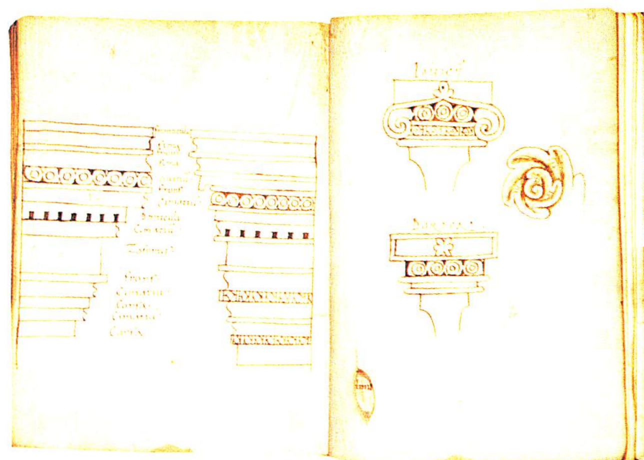
Les dix livres du traité de Vitruve

Selon Vitruve lui-même, il était déjà âgé et affaibli par la maladie quand il a écrit *De architectura.*
Le traité est divisé en dix livres : urbanisme et architecture au sens moderne des mots, mais aussi décoration, hydraulique et hydrologie, ingénierie civile et militaire.
– *Livre I* : formation de l'architecte. Définitions de l'architecture. Implantation des villes. Construction des enceintes et des tours. Orientation des vents. Distribution des bâtiments à l'intérieur de l'enceinte.
– *Livre II* : Évolution de l'humanité. Principes des choses. Matériaux.
– *Livre III* : Temples : plans et proportions, types, fondations, ordre ionique.
– *Livre IV* : Temples (suite) : les trois ordres, ornements des colonnes, ordre dorique, cella (lieu du temple où se trouvait la statue du Dieu) et pronaos (portique précédant le sanctuaire), orientation, portes et chambranles, ordre toscan, temples ronds et diverses autres dispositions, autels.
– *Livre V* : Forum et basiliques. Autres bâtiments publics (trésor, prison, curie). Théâtre : choix de l'emplacement, disposition des vases de résonance, forme du théâtre, plafond du portique, théâtres grecs, promenoirs. Bains. Palestres (lieux publics où l'on s'exerçait à la lutte et à la gymnastique). Ports.
– *Livre VI* : Maisons : disposition, proportions, mesures, différentes pièces, orientation, adaptation des maisons à leurs propriétaires. Maisons de campagne. Maisons grecques. Solidité et fondations.
– *Livre VII* : Revêtements et décoration : rudération (pavage en cailloux ou petites pierres), stuc, planchers voûtés, enduits dans les lieux humides, peintures, couleurs.
– *Livre VIII* : Manières de trouver l'eau. Propriétés des eaux. Moyens d'apprécier la salubrité. Adduction d'eau.
– *Livre IX* : Astronomie : ordonnance d'ensemble de l'univers, planètes, lune, soleil, sphère céleste, astrologie et météorologie. Gnomonique : cadrans solaires, horloges à eau.
– *Livre X* : Mécanique : définitions et histoire. Mécanique civile : machines de soulèvement, principes de mécanique, appareils pour élever l'eau, orgue hydraulique, odomètre (instrument pour calculer le nombre de pas effectués par une personne ou le nombre de tours d'une roue). Mécanique militaire : scorpion, baliste, réglage des machines de jet, machines de siège, art de la défense.

De architectura. La première serait une traduction incomplète du Livre I, publiée entre 1550 et 1560, par l'architecte Hernán Ruiz el Joven. Celle, manuscrite, des Livres IX et X, d'après l'édition de Cesariano, et relativement contemporaine de la précédente, est conservée à la bibliothèque de la Real Academia de la Historia à Madrid. En France, la diffusion du *De architectura* ne débute qu'en 1547. Cette année-là, paraît la première traduction de J. Martin, illustrée par Jean Goujon. Celle-ci (relayant les éditions illustrées italiennes, notamment celle de Fra Giocondo) jouera un rôle majeur dans la diffusion du Vitruvianisme. Notons toutefois qu'elle fut précédée par la publication, à Rome en 1544, des travaux d'un humaniste français, G. Philandrier (*In decem libros M. Vitruuii Pollonis de Architectura annotationes*).

Qu'apporte Vitruve à ces hommes de la Renaissance ? Un modèle de connaissance encyclopédique qui convient à leur soif d'apprendre, et une unité du savoir, concept particulièrement présent chez Léonard de Vinci. En outre, le principe même du « corpus », adopté par Vitruve, offre à tout lecteur curieux quantité de renseignements sur l'Antiquité (anecdotes, listes d'auteurs, monuments...), sur les sciences en général (météorologie, astronomie, musique, géométrie) et sur des techniques de construction de bâtiments, de machines, de décoration... encore applicables au Moyen Age et à la Renaissance.

Vitruve n'est cependant pas le seul architecte-ingénieur connu de l'Antiquité. Nous pouvons aussi citer Apollodore de Damas, qui construisit le forum de Trajan à Rome et écrivit un traité de poliorcétique (« l'art de prendre les villes »). Mais, une fois encore, cette catégorie d'architectes-ingénieurs va réellement prendre son essor à la Renaissance. Ainsi, l'exposition sur « Les ingénieurs de la Renaissance » (Paris, Cité des Sciences et de l'Industrie, 14.11.95 - 12.5.96), a permis de constater une évidente corrélation entre Vitruve et des personnages comme F. Brunelleschi, Taccola, F. di Giorgio, ou L. de Vinci. Brunelleschi n'a pas seulement édifié la coupole de la cathédrale de Florence. Il a aussi conçu les machines de levage du chantier ; des machines auxquelles Vitruve consacre tout un chapitre de son Livre X. De même que Vitruve a, semble-t-il, travaillé pour la *cura aquarum*, le « service des eaux » de Rome, F. di Giorgio a été *operario dei bottini*, chargé de l'entretien et du bon fonctionnement des canaux à Sienne, en 1469 et 1492. Enfin, Léonard de Vinci, comme Vitruve, a embrassé tout le domaine de l'ingénierie civile et militaire. Sa méthode d'analyse des machines, qu'il conçoit comme un assemblage de mécanismes, présente une analogie certaine avec le troisième chapitre du Livre X de Vitruve sur les principes des systèmes mécaniques. ■


P. HORVAIS - EXPLORER BIBL. DE SELESTAT

C'est dans le livre IV du *De architectura* que sont présentés les divers types d'ornementation des colonnes de temples.

Pour en savoir plus :
Livres de Vitruve parus en édition bilingue (latin-français) dans la collection des Universités de France, (« Collection Budé », Paris, Les Belles Lettres) :

Livre I, par Ph. Fleury, Livres III et IV par P. Gros, Livre VII par M.T. Cam, B. Liou et M. Zuinghedau, Livre VIII par L. Callebat, Livre IX par J. Soubiran, Livre X par L. Callebat et Ph. Fleury.

Premières leçons de perspective

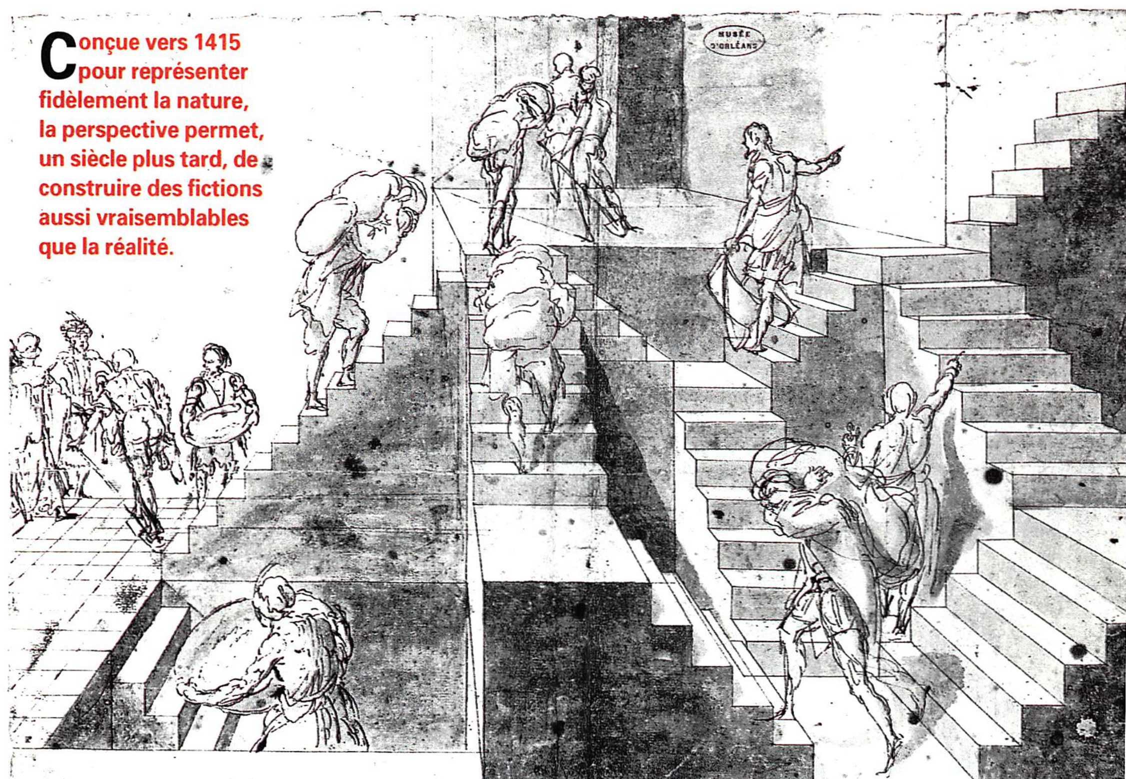
Comment représenter le réel, tel que l'œil le perçoit ? L'architecte et sculpteur Brunelleschi s'y attelle et brosse, en quelques coups de pinceaux, les premières règles de la perspective. Des horizons nouveaux s'ouvrent ainsi à la peinture.

Par Vanina Pialot

C'est à Florence, vers 1415, qu'est « inventée » la perspective. Par le biais de deux expériences, Filippo Brunelleschi, peintre, sculpteur, et architecte, montre alors que les règles de construction picturale qu'il emploie permettent de reproduire parfaitement la réalité.

De fait, jusqu'au début du XVe siècle, les tableaux ne font qu'allusion au réel. Les lois qui les régissent sont celles de la narration, et non celles de l'espace. Les dimensions des personnages résultent de leur hiérarchie sociale (rois plus grands que leurs vassaux, eux-mêmes plus grands que leurs sujets...), ou religieuse. Mais au sortir du Moyen Age, l'humanisme ouvre une nouvelle voie à la peinture.

Déconsidérant l'art médiéval, les humanistes obéissent à deux principes : retrouver les idéaux antiques, et percer les secrets de la nature. Leur peinture se donne pour but la restitution du réel, tel que l'œil le perçoit. Ce qu'Albrecht Dürer résumera ainsi : « *Et sache que plus exactement tu approches la nature par la voie de l'imitation, plus belle et plus artistique deviendra l'œuvre* ».



Conçue vers 1415 pour représenter fidèlement la nature, la perspective permet, un siècle plus tard, de construire des fictions aussi vraisemblables que la réalité.

PREMIERES LEÇONS DE PERSPECTIVE

La découverte des lois de la perspective va être d'une grande utilité pour ces « nouveaux peintres ». Antonio Manetti, ami et biographe de Brunelleschi, l'attribue sans équivoque à ce dernier. Dans sa *Vita de Brunelleschi* (1475), il affirme que *« C'est lui qui (...) promut et expérimenta ce que les peintres nomment aujourd'hui perspective* (...) *c'est lui qui inventa la règle qui est le fondement de tout ce qui s'est fait depuis lors en la matière. »*

Brunelleschi, qui a parcouru l'Italie pour étudier l'architecture des monuments antiques, cherche à représenter fidèlement ce qu'il observe. Le premier tableau en perspective qu'il réalise, en ce début de XVe siècle, représente une petite église florentine : le baptistère San Giovanni. Celui-ci se situe face à la Cathédrale Santa Maria del Fiore, dont il réalisera, quelques années plus tard, la superbe coupole. Le baptistère est peint sur un petit panneau, une *tavoletta*. Il apparaît tel qu'on le voit en tournant le dos à la Cathédrale.

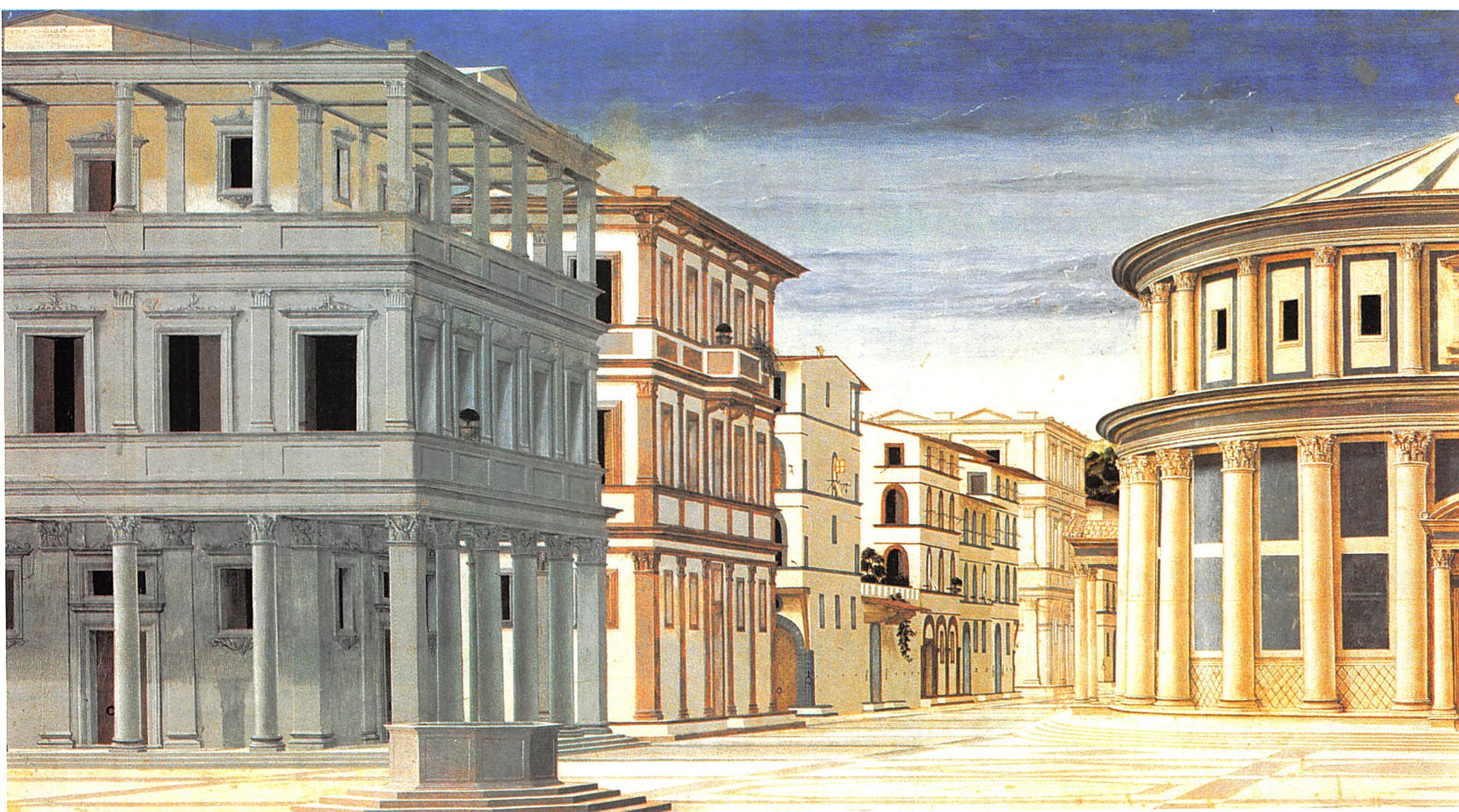
Sur le parvis de la Cathédrale, Brunelleschi ne passe pas inaperçu. Dans sa *tavoletta*, le baptistère, alternant le marbre blanc de Carrare et le marbre vert de Prato, est peint avec un tel réalisme, que, selon Manetti, *« aucun miniaturiste n'aurait fait mieux »*. Mais plus que la beauté de la peinture, c'est le dispositif mis au point par le peintre qui suscite l'étonnement : il permet de confondre image et réalité.

Son expérience nécessite le respect d'un certain nombre de conditions (voir figure 1). En effet, d'après Manetti, *« comme le peintre doit supposer un seul point pour voir sa peinture (...), puisque tout changement de lieu entraîne une vision différente, il avait fait dans le panneau supportant cette peinture un trou au point exact de l'église san Giovanni où frappait le regard de qui se trouverait à l'intérieur de la porte centrale de Santa Maria del Fiore, endroit où il se serait placé s'il l'avait peint sur le motif.* (...) » Qui plus est, *« Il voulait que celui qui regardait appliquât l'œil au revers. »*

Le tableau de Brunelleschi ne se contemplait pas de façon ordinaire. Une fois l'œil appuyé sur le verso du tableau, il fallait *« qu'une main fût placée près de l'œil et que l'autre tînt, face à la peinture, un miroir plan où celle-ci vînt se réfléchir »* Résultat : *« En le regardant, on croyait voir la réalité même. Ayant eu ce dispositif en main et l'ayant vu plusieurs fois jadis, je peux en porter témoignage. »*

Si l'on en croit Giorgio Vasari, un peintre et architecte du siècle suivant, Brunelleschi s'attaque à un deuxième tableau à la suite des louanges immodérées qu'il reçoit. Pour celui-ci, effectué cette fois sur un grand panneau, il peint, toujours avec le même réalisme, la place florentine de la Seigneurie. Cette *Piazza della Signoria* est représentée de telle façon qu'en se

Pour établir la trame de leurs perspectives, les peintres utilisent un point de fuite central. Ils s'aident d'un carrelage qu'ils échelonnent en profondeur (*Vue de la Cité Idéale*, attribuée à F. di Giorgio Martini et L. Laurana).



plaçant devant le tableau, on a le sentiment d'être à l'entrée de la place. Le haut du tableau est découpé le long des contours des bâtiments (voir figure 2).

Ce tableau-là est si grand qu'il ne peut être tenu à bout de bras. Il est donc posé à terre, à l'entrée de la place. Lorsqu'on le regarde depuis la distance adéquate, sa silhouette découpée se superpose exactement à la bordure supérieure des édifices et monuments réels. D'après Manetti, c'est une nouvelle réussite. *« Plus tard,* souligne-t-il, *Paolo Uccello et d'autres peintres voulurent copier et imiter cette peinture ; j'en ai vu plus d'un exemple, mais ce n'était jamais aussi réussi. »*

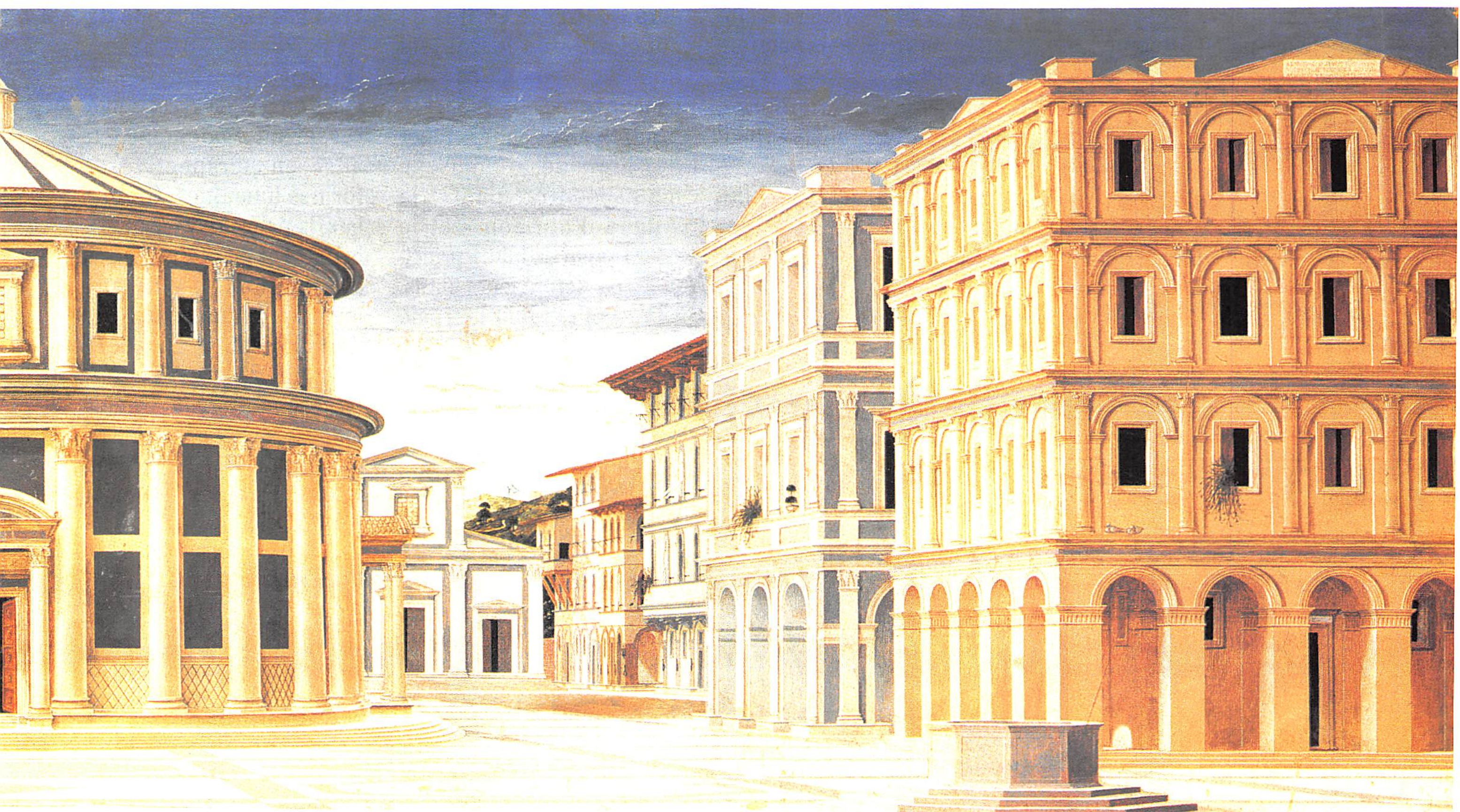
Dès cette époque, on distingue deux sortes de perspectives : la *perspectiva naturalis* et la *perspectiva artificialis*. La première correspond à la science de l'optique. Elle étudie la diminution apparente des objets sous l'effet de la distance. La seconde cherche à plier les représentations artistiques aux lois de l'optique. Le tableau devient alors le simple plan de projection de ce qui se trouve derrière lui.

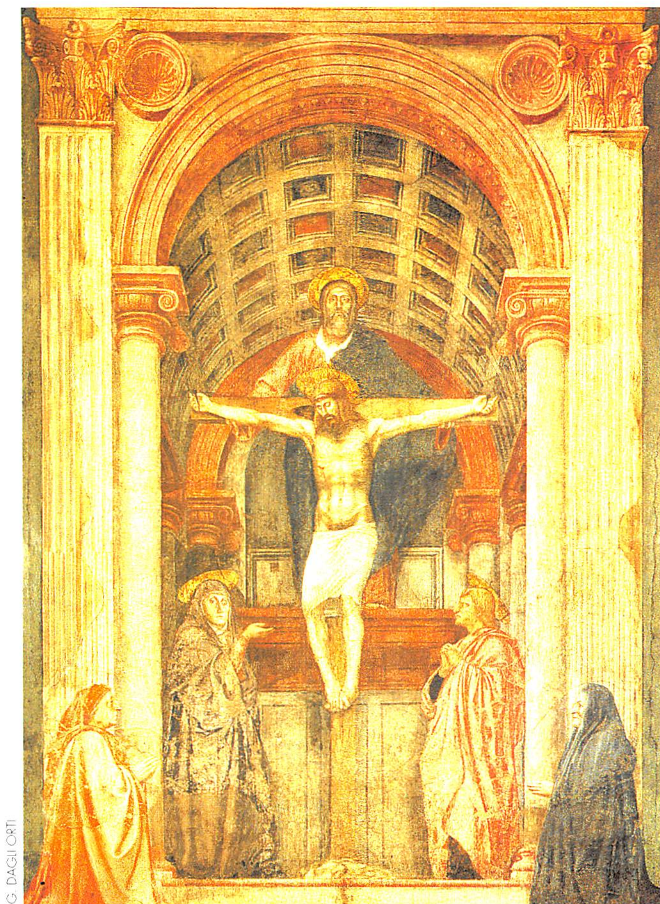
En « perspective artificielle », et plus précisément, en perspective centrale (c'est celle qu'utilise Brunelleschi), on suppose l'existence d'un centre : un point d'où on peut apprécier ce que le peintre a vu. L'observateur doit ensuite fixer son regard sur un point précis du tableau : le « point principal ». Généralement, toutes les droites parallèles convergent vers lui. C'est précisément ce point que Brunelleschi a choisi pour percer sa *tavoletta* : grâce au miroir, le point de vue du spectateur se superpose ainsi au point principal.

Selon Manetti, Brunelleschi *« inventa la règle »*. Pourtant, les Anciens connaissaient sans aucun doute le problème de la diminution apparente des objets avec la distance. Il n'est qu'à se référer aux écrits de Vitruve, au premier siècle avant J.-C. *« Démocrite et Anaxagore,* explique-t-il, *ont rédigé un écrit (...) sur la manière dont, quand on suppose le centre en un lieu déterminé, les lignes doivent, selon les lois de la nature, correspondre au lieu de la faculté visuelle et à l'extension en ligne droite des rayons visuels ».*

Leur objectif, selon Vitruve, consiste à *« reproduire les édifices tels qu'ils nous apparaissent »* dans les décors de théâtre. Exactement le but des peintres de la Renaissance...

De l'histoire de la perspective, Manetti dira : *« L'on ne sait pas si les peintres anciens, ceux-là d'il y a plusieurs centaines d'années, à l'époque qui était celle des grands sculpteurs (...), la connaissaient et la pratiquaient avec raison. »* Son contemporain Filarète, sculpteur et architecte florentin, n'hésitera pas à écrire : *« Si subtils et pénétrants qu'ils aient pu être, cette façon-là de perspective n'aura jamais été utilisée ni même comprise par les Anciens ; si, dans les choses qui les concernaient, ceux-ci ont pu agir avec discernement, ce n'est cependant pas selon ces voies et raisons qu'ils disposaient les choses sur le plan ».* Brunelleschi apparaît donc comme un précurseur. Après lui, de





G. DAGLI ORTI

Grand innovateur de l'art florentin, Massacio réalise, en 1427, la fresque de la *Trinité* (Santa Maria Novella), selon les strictes règles de la perspective. Brunelleschi y aurait collaboré.

nombreux peintres et sculpteurs – tels Donatello, Fra Angelico, Fra Lippo Lippi, Piero della Francesca, Paolo Ucello, etc. – vont élaborer la « grammaire » de la perspective.

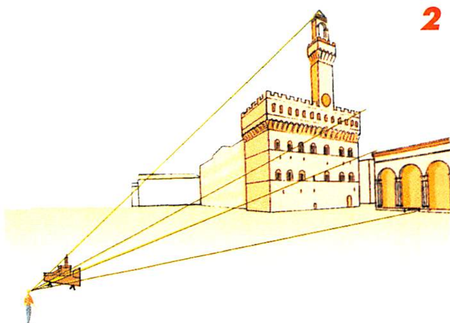
En 1427, Masaccio, un jeune peintre florentin, réalise la première perspective architecturale rigoureuse : la fresque de la Trinité de l'église Santa Maria Novella. Quelques années plus tard, Leone Battista Alberti, architecte et théoricien de l'art, écrit le premier traité théorique de perspective. Reconnaissant dans l'art de Brunelleschi l'affirmation de ses propres principes, il lui dédie son traité. Ce *Della pittura* (1435) établit une méthode de construction en perspective, la *costruzione legittima*. L'image de chaque objet peint est alors calculée point par point, en déterminant l'intersection des rayons visuels et du plan du tableau.

Reliés à l'œil en lignes droites, ces rayons visuels se « posent » en effet sur l'objet. Ils forment une pyramide visuelle, dont le sommet est l'œil, et la base l'objet contemplé. Le plan du tableau va se placer entre les deux. Il constitue en quelque sorte une section de la pyramide. Chaque point de la « base » va s'y projeter.

Si elle permet de représenter fidèlement les images perçues, la *costruzione legittima* est cependant d'un emploi limité. Elle ne concerne que les objets dont les dimensions sont connues avec précision. Les peintres vont donc chercher des procédés d'un usage moins contraignant : la « ligne d'horizon » et le « point de fuite » principal seront leurs outils. Pour établir la trame de base de leur toile, ils s'aideront d'un carrelage représenté en vue frontale. Ses lignes fuyantes convergeront vers le point principal du tableau, qualifié de point de fuite principal.

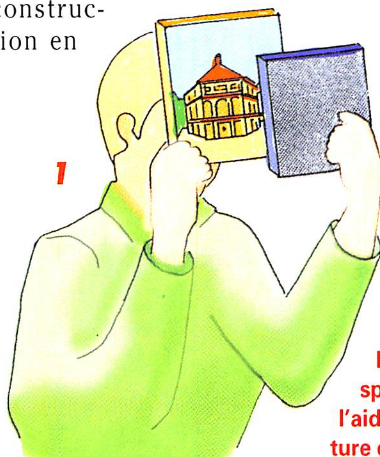
De fil en aiguille, ces recherches aboutissent au premier traité de perspective imprimé : en 1505, Jean Pèlerin, dit le Viator, publie son *De artificiali perspective*. L'ouvrage comporte 37 gravures sur bois. Celles-ci représentent essentiellement des édifices, dont la mise en perspective est brièvement expliquée par un tracé du plan au sol. Outre le point principal, elles s'appuient sur d'autres points de la ligne d'horizon. Ils correspondent aux points de fuite des diagonales des carreaux du sol.

Nombre de traités vont s'inspirer de la méthode du Viator. On pourrait citer, à titre d'exemple, le Français Jean Cousin, le Hollandais Vredeman de Vries, et l'Italien Daniele Barbaro... Outre la représentation de villes ou d'édifices, ils s'intéresseront également à la mise en perspective de formes humaines. Grâce à eux, la peinture va acquérir le statut de discipline intellectuelle : elle sera même promue au titre des « arts libéraux ». Et la perspective, d'abord conçue pour reproduire fidèlement la nature, va permettre de construire des fictions aussi vraisemblables que la réalité. ■



DESSINS A. MEYER

Dans une autre expérience, Brunelleschi découpe son tableau en suivant les contours des édifices peints. En adoptant le point de vue du peintre, le spectateur voit la silhouette du panneau se superposer aux édifices réels.



En appliquant son œil au revers du tableau, contre le trou, et en se plaçant là où Brunelleschi a peint, le spectateur peut vérifier à l'aide du miroir que la peinture est fidèle à la réalité.

POUR EN SAVOIR PLUS :

– Hubert Damisch, L'origine de la perspective, Flammarion, 1987.
– Philippe Comar, La perspective en jeu, Découvertes Gallimard, 1992.

3 L'IMPRIMERIE CHANGE DE CARACTÈRE



Inventée en Allemagne, la nouvelle technique d'impression gagne l'Italie et s'épanouit à Venise. Si les livres abondent, ils pèchent souvent par leur qualité... Jusqu'à l'arrivée d'Alde Manuce qui redonne à la profession ses lettres de noblesse.

PAR VANINA PIALOT

G. DAGLI ORTI

Venise, 1469. La ville est en pleine expansion. Partout, des palais sont en construction. Les ponts de bois, qui enjambent les innombrables canaux, cèdent la place aux ponts de pierre... Cette année-là, un imprimeur allemand, Joannes de Spira, dépose une demande de privilège [1] pour l'exploitation de son art. Le 18 septembre, il obtient pour cinq ans le monopole de l'imprimerie. Il vient de l'introduire dans la cité des Doges.

C'est en Allemagne, dans la région de Mayence, qu'est née l'imprimerie. C'est là que Gutemberg a imprimé ses premiers livres, peu après 1450. Les caractères qu'il utilise, formés chacun d'une lettre de l'alphabet, sont mobiles. Ils peuvent donc être employés plusieurs fois, pour différentes épreuves. Ce principe a fait le succès immédiat de la méthode. Au XVe siècle, d'autres techniques d'impression continuent d'avoir cours : certains textes sont encore gravés sur des plaques de bois (xylographie) ou de cuivre.

1 – Ce document est le plus ancien connu en matière de législation de brevets.

Dès 1469, poussés par l'appât du gain, nombre d'artisans italiens se lancent dans l'imprimerie. Seuls quelques-uns vont s'imposer.

L'IMPRIMERIE CHANGE DE CARACTERE

A ses débuts, l'imprimerie affronte la concurrence des copistes, qui produisent jusqu'à 200 exemplaires d'un ouvrage.



G. DAGLI ORTI

Leur défaut majeur : la plaque une fois gravée ne peut être décomposée, et n'est donc pas utilisable pour un autre texte.

Rapidement, l'art d'imprimer se répand en Europe. En 1464, deux ouvriers de Gutemberg, Sweynheim et Pannartz, l'introduisent en Italie. Ils s'établissent à Subiaco, puis à Rome. Venise n'est donc pas la première ville italienne à avoir accueilli l'imprimerie. C'est elle, pourtant, qui va subir l'influence du nouvel art de la façon la plus marquante.

De fait, quelques mois après l'obtention de son privilège, Joannes de Spira meurt. Or, un monopole expire avec son titulaire... Très vite, nombre de concurrents vont donc s'installer. Et la Merceria de Venise, qui relie la place San Marco au pont du Rialto, va crouler sous les étals de livres. La cité devient la plus active d'Italie dans le domaine de l'imprimerie. Entre 1469 et 1500, on y dénombre plus de 150 ateliers différents, à l'origine d'au moins 4 000 éditions. Moins que l'ensemble des livres publiés dans les villes germaniques [2], mais le double de la production de sa principale concurrente en matière de textes classiques : Paris.

« Quand je me suis aperçu, écrit un imprimeur bâlois du XVIe siècle, *que les imprimeurs faisaient de bonnes affaires, et qu'ils travaillaient peu pour un bon profit, j'ai pensé : moi aussi je veux être imprimeur ! »* C'est en effet l'appât du gain qui pousse de nombreux artisans dans cette voie – pourtant, un imprimeur dont l'affaire tourne bien fait dix fois moins de bénéfices qu'un marchand d'épices. D'un autre côté, il est assez facile de s'installer dans ce nouveau métier, encore trop récent pour être soumis à des règlements.

En réalité, un petit nombre d'imprimeurs connaissent le succès. Les autres, souvent criblés de dettes, vivent difficilement. D'une centaine d'ateliers vénitiens, en 1490, il n'en restera qu'une dizaine, à la fin du siècle. Les difficultés du métier viennent en grande partie du coût du matériel (presse, papier, caractères), qui nécessite l'immobilisation d'importants capitaux. S'y ajoutent des frais de main-d'œuvre, d'autant plus importants que les imprimeurs réalisent rarement la totalité du procédé d'impression. La plupart d'entre eux sous-traitent en effet la gravure et la fonte des caractères.

La production d'un livre s'avère coûteuse, et sa commercialisation pose de nouveaux problèmes. Pour rentabiliser leur investissement, les imprimeurs doivent en effet vendre, dans les plus brefs délais, un grand nombre de livres. Reste à savoir quels textes choisir, à qui les vendre, et en combien d'exemplaires... L'expérience des manuscrits, dont la fabrication est adaptée à la demande, ne peut en rien les aider. Vers 1470, se laissant entraîner par les érudits, ils inondent d'un coup Venise de textes classiques. Le nombre colossal d'invendus plonge l'industrie dans la crise : trois ans plus tard, la production chute de 65 % !

Jusqu'au début du XVIe siècle, le marché sera dominé par trois noms : Nicolas Jenson et Joannes de Colonia, qui débutent dans les années 1470, puis, une vingtaine d'années plus tard, Alde Manuce. Jenson arrive à Venise l'année même de la mort de Joannes de Spira. Les dix ans qui suivent consacrent son succès, ainsi que celui de Joannes de Colonia. A eux seuls, ils produisent 43 % des éditions vénitiennes.

L'une des premières caractéristiques du nouvel art va être de changer le rapport des contemporains au livre. Jusque-là, seuls certains types de manuscrits étaient produits en série [3] dans des ateliers où copistes, rubricateurs et enlumineurs travaillaient de concert sur les diverses parties de l'original. Seuls les quelques érudits qui consacraient leur fortune à la réalisation d'une bibliothèque, pouvaient se les offrir. Avec l'imprimerie, des livres autrefois inaccessibles sont désormais édités en assez grand nombre [4]. Ce qui suscite les réactions les plus diverses...

2 – Pendant cette période, dite des incunables (livres imprimés avant 1500), plus de la moitié des livres sont publiés dans des villes allemandes. L'Italie se place loin derrière, suivie par la France.
3 – Le manuscrit original était "cassé" en plusieurs cahiers (*peciae*). Chaque copiste reproduisait toujours le même cahier de 6-8 pages. On pouvait ainsi produire jusqu'à 200 exemplaires d'un ouvrage.
4 – Le tirage des premiers livres imprimés est d'environ 500 exemplaires. Il concerne des livres plus gros que ceux sur lesquels travaillent les copistes.



J.L. CHARMET - BIBL. STE GENEVIEVE

Pour vaincre la défiance de leurs lecteurs, les imprimeurs utilisent d'abord des caractères identiques à ceux des manuscrits.

Certains, portés par l'idéal humaniste, voient dans cette révolution l'avènement tant attendu de la diffusion universelle de la connaissance. En Italie, Giovanni Andrea de Bussi, évêque d'Aléria et éditeur des imprimeurs Sweynheim et Pannartz, se réjouit ainsi à l'idée de voir les textes imprimés *« se répandre par toute la terre en une puissante marée »*. S'ils sont de qualité médiocre, pense-t-il, ils seront forcément revus et corrigés par les savants qui les liront. Des corrections y seront apportées, et ils pourront être réédités. *« Mon but, mon plus cher désir*, écrit-il, *est que les habitants du monde latin deviennent tous plus savants, et moi aussi. »*



GIRAUDON - BN

Alde Manuce, inventeur du caractère italique, imprimera quelque 100 000 ouvrages.

D'autres, comme le frère dominicain Filippo di Strata, sont particulièrement virulents à l'encontre de l'imprimerie. Loin de se perfectionner, disent-ils, le savoir ne peut que se dégrader. Le marché envahi par des éditions de piètre qualité, les bons manuscrits seront voués à disparaître. Et avec eux, le bon usage du latin. Plus grave, l'imprimerie conduirait tout droit à la perversion de la société, en diffusant des textes païens ou érotiques. Pis encore, traduite en langue vulgaire, la bible menacerait l'intégrité religieuse des gens simples...

Sans être aussi critiques que ce Fra Filippo, les intellectuels ne décernent leur satisfecit qu'à une poignée d'imprimeurs. Ce sont en général des hommes cultivés, qui ne ménagent pas leurs efforts pour publier des textes aussi parfaits que possible. Ils font appel à des correcteurs, et les textes qu'ils impriment sont comparés aux originaux.

De fait, pour amortir leurs frais, nombre d'imprimeurs peu scrupuleux publient des livres d'une piètre qualité. Des éditions de textes classiques sont préparées à vive allure, sans que l'on se soucie des versions originales... Par

exemple, des étudiants notent les commentaires de leurs professeurs, ajoutent leurs propres interprétations, puis apportent le tout à un imprimeur. La profession entière va longtemps pâtir de cette mauvaise réputation.

Dans un premier temps, la diffusion universelle des livres, qu'elle soit souhaitée ou redoutée, est loin d'être effective. En effet, les premiers textes imprimés s'adressent exclusivement aux intellectuels. D'ailleurs, pour vaincre la défiance de ce lectorat traditionnel, les imprimeurs cherchent d'abord à gommer les différences entre leurs textes et ceux des copistes, en utilisant les mêmes types de caractères. Et bien souvent, le nom de l'éditeur n'est même pas mentionné...

La plupart des imprimeurs se contentent de suivre les modes intellectuelles dominantes. C'est ainsi que vont se succéder, jusqu'à la fin du XVe siècle, les éditions d'auteurs classiques : Virgile, Horace, Tite-Live, Valère Maxime, et surtout Ciceron. A la même époque, les livres théologiques et liturgiques constituent la seconde grande catégorie d'ouvrages : ils forment l'essentiel des fonds de librairies. Les textes juridiques bénéficient d'un grand prestige, mais seuls les imprimeurs argentés prennent le risque de les publier : leur fabrication est coûteuse, et leur vente très irrégulière. Certains font même fortune grâce au droit, profitant de la proximité de grandes universités [5]. Enfin, vers la fin du XVe siècle, des textes en langues orientales, des cartes et des partitions apparaissent sur le marché.



EXPLORER ARCHIVES

Vers la fin du XVe siècle, les cartes font leur apparition sur le marché (ici une carte des côtes méditerranéennes).

A partir de cette époque, les rapports entre intellectuels et imprimeurs vont évoluer dans un sens plus favorable. Un homme y contribue plus que tous les autres : Alde Manuce. Humaniste de renom, il s'établit à Venise en 1489. Cinq ans plus tard, il y imprime un premier livre : la *Grammaire grecque* de Lascaris. Il sera suivi l'année d'après par un volume d'Aristote. En l'espace de trois ans, il publiera plus de quarante ouvrages...

Entouré de nombreux conseillers, Alde réalise un travail d'édition et de correction considérable. Attribuant à la littérature un rôle civilisateur, il souhaite restituer les textes des auteurs classiques (latins et grecs) dans leur version d'origine : les livres qu'il imprime sont d'ailleurs dépouillés de tout commentaire. Il s'applique par ailleurs à produire de « beaux livres ». Pour chacune de ses éditions, il fait refondre la totalité des caractères qui ont été utilisés ! Enfin, il renouvelle la typographie en inventant le caractère italique en 1501.

Girolamo Bologni, un de ses contemporains, le qualifie un peu pompeusement de *« sauveur de la littérature grecque et latine »*. Il est à ses yeux *« le plus glorieux éditeur de tous les temps »*. La réputation de l'imprimeur est solide, et l'admiration de Bologni fait l'unanimité. Alde Manuce, qui selon Bologni *« ne coule pas une page dans le bronze qu'elle ne soit parfaite »*, utilise ses relations pour faire accepter ses textes, réhabilitant peu à peu sa profession.

Le début du XVIe siècle voit l'imprimerie prendre une importance croissante dans le monde des lettres. Les formats *in-octavo* – résultant du pliage en 3 puis 4 d'une feuille d'impression – plus maniables et moins chers que les *in-folio*, permettent de toucher un public progressivement élargi. De nombreux auteurs goûtent à la célébrité. Mais c'est sans aucun doute Erasme qui, le premier, peut vivre uniquement du profit de ses œuvres. Conscient très tôt du pouvoir de l'imprimerie, il est encore inconnu quand – lucidité ou prémonition ? – il écrit à Alde Manuce : *« J'estime que mes travaux acquerraient l'immortalité s'ils voyaient le jour imprimé dans vos caractères. »*

De fait, après Gutenberg, Alde Manuce est l'une des grandes figures mythiques de l'histoire du livre. Sa production totale est estimée, au bas mot, à quelque 100 000 exemplaires. *« Ceux qui cultivent les lettres doivent être munis de livres,* écrivait-il, *et tant que cette fourniture n'est pas achevée, je ne m'arrêterai pas. »* Le courtisan pointe sous le défenseur des belles lettres : Alde Manuce souhaite la diffusion des livres... parmi les érudits. Et s'il a effectivement fait accepter le livre imprimé dans le monde du savoir, il n'a pas le moins du monde cherché à le répandre dans le reste de la population... ■

5 – Ce type de publication représentait 29 % de la production de Jenson, et 48% de celle de Joannes de Colonia.

Nous tenons à remercier, pour sa précieuse collaboration, Guy Bechtel, docteur en histoire et auteur de *Gutenberg et l'invention de l'imprimerie*, publié chez Fayard en 1992.

4 COMPTABILITÉ : LA GRANDE MUTATION

De la notation chronologique, les comptes passent à un classement méthodique : chaque opération est inscrite en termes de crédit et débit. La comptabilité peut alors entrer dans l'époque moderne.

PAR PHILIPPE BRAUNSTEIN

La comptabilité puise ses racines dans le mémorial, livre où les particuliers notent leurs engagements dans des opérations de crédit. Une précaution qui leur permet de ne pas en oublier le montant et l'échéance. On retrouve des mémoriaux sous leur forme la plus simple – des écritures dans l'ordre chronologique– dans les archives privées de l'Europe entière, et ce, jusqu'à l'époque moderne.

Dès le XIIIe siècle, les grandes entreprises italiennes, manufacturières ou marchandes, commencent cependant à organiser et classer leurs comptes. Ceux-ci lient l'opérateur économique à ses clients et fournisseurs d'une part, à ses associés d'autre part. En fin d'exercice, la répartition des bénéfices et des pertes devient ainsi plus aisée, et l'enregistrement comptable acquiert, dans les villes marchandes, valeur de preuve en cas de litige.

Parallèlement, à partir du XIIIe siècle, on acquiert la connaissance des marchandises et espèces monétaires en circulation dans les grandes foires d'Occident jusqu'aux Echelles du Levant. Par ailleurs, la lettre de change devient de plus en plus utilisée. Enfin, grâce à l'arithmétique, on sait résoudre des problèmes complexes, tels que la division des profits d'une campagne d'exploitation minière, en fonction des parts sociales de mine. Les registres comptables en témoignent.

Peu à peu, les livres de compte s'organisent. On passe de notations inscrites les unes après les autres, à la séparation des dettes et créances. D'abord organisées en deux masses, ces dernières sont ensuite juxtaposées page à page, puis divisées par clients. Selon que ces derniers sont débiteurs ou créditeurs, le comptable adjoint à leur nom la mention « debet » (doit), ou « avere » (avoir).

L'emploi de ces deux termes s'étend progressivement à l'enregistrement des choses et valeurs abstraites (registres de succursales, de matières premières, de salaires, etc.). La « personnification » des comptes transforme l'entreprise en personne morale. Dans son ouvrage d'arithmétique, Luca Pacioli écrit, en 1494 : « *Figure-toi que cette boutique est une personne qui devient débitrice de tout ce que tu lui donnes, et créancière de tout ce qu'on lui ôte ou qu'on en reçoit...* ».

Au fur et à mesure de son développement, la comptabilité favorise et rationalise un certain nombre de pratiques de gestion. Elles franchit un cap décisif avec la création des comptes à partie double. Toute opération, positive ou négative, est alors inscrite à la fois dans les crédits et débits. Un compte supplémentaire permet ensuite de mesurer la répercussion de ces opérations sur le capital de l'entreprise, et d'en expliquer les variations : il s'agit du compte des profits et pertes. Il correspond à la somme algébrique des mutations.

D'abord utilisé par les entreprises privées, ce type de comptabilité s'étend au service public. En 1340, les trésoriers de la ville de Gênes tiennent des comptes à partie double, probablement sur le modèle d'enregistrement que pratiquaient les banques privées de la ville depuis le début du XIVe siècle.

A la fin du Moyen Age, les villes marchandes italiennes, Venise en tête, ont acquis une telle réputation en matière de comptabilité qu'on vient de toute l'Europe pour s'y initier. Cependant, le modèle italien ne conquiert pas toutes les grandes entreprises. Certaines, comme la puissante société des Fugger, au début du XVIe siècle, restent fidèles à des méthodes comptables moins globales.

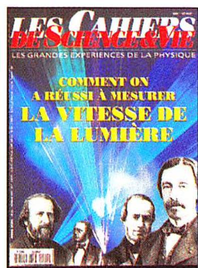
Quoi qu'il en soit, à compter de cette date, toutes les entreprises s'appuient sur les principes des comptables italiens : la gestion se déroule désormais dans un espace; la prévision économique ne peut exister sans un enregistrement méthodique des opérations dans le temps du compte. ■

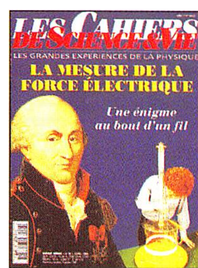
COLLECTIONNEZ LES TEMPS FORTS DE LA PHYSIQUE

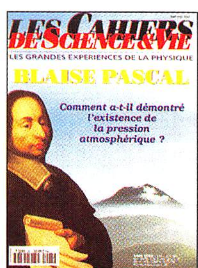
COLLECTION 1995

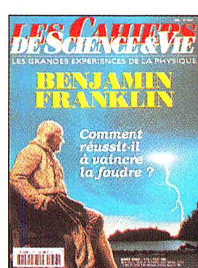
LES GRANDES EXPÉRIENCES DE LA PHYSIQUE

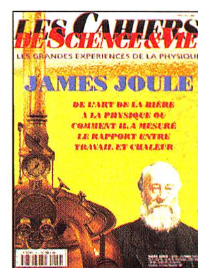
n° 25 - La mesure de la vitesse de la lumière : Fizeau et Foucault
n° 26 - La mesure de la force électrique : Coulomb
n° 27 - La mesure de la pression atmosphérique : Pascal
n° 28 - L'expérience sur la foudre : Franklin
n° 29 - L'équivalence chaleur/travail : Joule
n° 30 - La démonstration de l'existence des ondes radio : Hertz







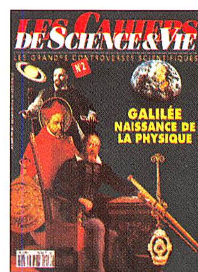


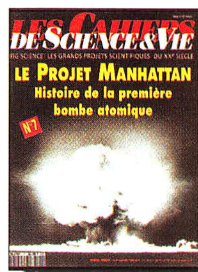


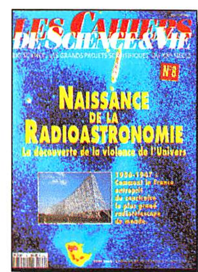


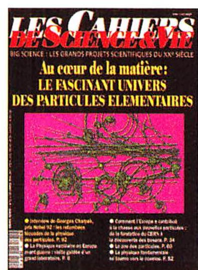
COLLECTION PHYSIQUE

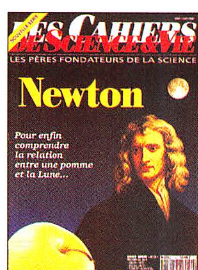
n° 2 - Galilée
n° 7 - Le projet Manhattan
n° 8 - La radio-astronomie
n° 12 - La physique géante
n° 13 - Newton
n° 16 - Einstein
n° 17 - Maxwell
n° 20 - Carnot
n° 21 - Képler

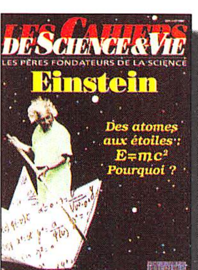


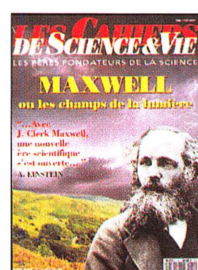




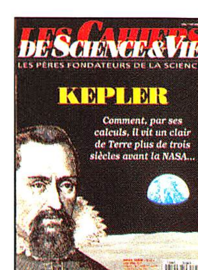












BON DE COMMANDE

à compléter et à retourner avec votre règlement à l'ordre des CAHIERS DE SCIENCE & VIE sous enveloppe affranchie à : Service VPC - 1, rue du Colonel Pierre Avia 75503 Paris cedex 15

❑ Je commande les numéros suivants des CAHIERS DE SCIENCE & VIE au prix unitaire de 32 francs*

❑ 25 ❑ 26 ❑ 27 ❑ 28 ❑ 29 ❑ 30
❑ 2 ❑ 7 ❑ 8 ❑ 12 ❑ 13 ❑ 16
❑ 17 ❑ 20 ❑ 21

❑ Je commande la collection 1995 des CAHIERS DE SCIENCE & VIE du n°25 au n°30 : 160 francs au lieu de 192 francs*

❑ Je commande la collection physique des CAHIERS DE SCIENCE & VIE 9 fascicules : 240 francs au lieu de 288 francs*

❑ Je commande .... reliure(s) des CAHIERS DE SCIENCE & VIE au prix unitaire de 65 francs - étranger 75 francs

• Cochez S.V.P.

• Le montant de ma commande est de ______ francs

Nom

Prénom

Adresse

Code postal   Ville

En application de l'article L 27 de la loi du 6/01/1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et sont exclusivement communiquées au destinataire la traitant. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès d'Excelsior. Vous pouvez vous opposer à ce que vos nom et adresse soient communiqués ultérieurement.

Offres valables jusqu'à fin 1996 et réservées à la France Métropolitaine
Etranger: nous consulter Tel (33-1) 46 48 47 18
(*) Prix de vente normal chez votre marchand de journaux

Elegante et pratique, chaque reliure est conçue pour classer 12 numéros des CAHIERS DE SCIENCE & VIE

RC PARIS B 572 134 773

La gravure : quelle technique ?

Vers 1450, apparaît une nouvelle méthode de gravure, la « taille-douce » sur métal. Elle succède à la « taille-épargne » sur bois, méthode de gravure grossière qui obligeait le graveur à tailler le bois dans le sens des fibres pour éviter leur éclatement sous l'outil. La « taille-douce » pratiquée le plus fréquemment sur du cuivre rouge, s'effectue à l'aide d'une pointe d'acier trempé ou d'un burin. L'outil coupe aisément le métal, quel que soit le sens de la plaque. Le moindre point répond à l'impression et se retrouve sur l'épreuve. La tradition attribue à l'orfèvre florentin, Maso Finiguerra (1426-1464), l'idée d'encrer ses plaques incisées pour reproduire le dessin sur un papier légèrement humidifié, passé sous une presse. Raphaël, Botticelli, Mantegna l'adoptent aussitôt. Dürer, lui, préfère la gravure à l'eau forte ou acide nitrique. Le dessin est gravé à l'aide d'un stylet sur une planche vernie. La pointe sèche n'ôte pas le cuivre mais le repousse, donnant un velouté spécial à la ligne. La plaque est ensuite plongée dans l'eau forte, et rongée par l'acide aux endroits dessinés. (Dürer, *La mélancolie*)



ARTEPHOT - FAILLET, MUSÉE DE CLUNY



J.L. CHARMET - BN

La faïence de Faenza

Au pied des Appenins, la petite ville de Faenza porte bien son nom. Au XVe siècle, elle devient le centre de fabrication d'une céramique bientôt renommée : la faïence. Les fabriques réputées, comme la Casa Pirota, se multiplient. La technique, elle, est la même pour tous. Le décor est dessiné sur de l'émail cru et sec. Après l'apposition des couleurs, la pièce est portée au feu. Au début du XVIe siècle, Girolamo Della Robbia (1488-1566) sera l'un des fondateurs des premières faïenceries françaises de Lyon et Nevers.

Le verre dans tous ses états

Depuis 1463, à Venise, on sait, pour les besoins d'une production artistique, produire du « verre blanc », le « cristallin », grâce à de l'oxyde d'étain. Ce verre silico-alcalin (silicate de potasse et chaux), plus blanc et plus transparent que les autres, fait la fortune des ateliers de Murano. Son secret de fabrication est bien gardé, le verrier qui s'expatrie est puni de mort. Aux siècles suivants, les progrès de la technique du verre en multiplient ses usages : les vitres vont remplacer les vitraux colorés du Moyen Âge, les toiles enduites ou papiers translucides appliqués sur les fenêtres. Le travail des lentilles en verre blanc permettra la réalisation des premières longues-vues.

Une industrie en plein essor : le textile

En 1467, la Castille compte 2 700 000 têtes de moutons. Un cheptel destiné au développement du textile le plus répandu d'Europe : la laine. Si l'on sait carder depuis le XIVe siècle, les XVe et XVIe siècles apportent quelques perfectionnements. Le rouet remplace peu à peu le fuseau et la quenouille. Cette machine à filer, équipée d'une roue, est entraînée par une pédale ou une manivelle, et par une broche à ailettes, qui donne au fil une torsion supplémentaire. Autre amélioration, plus esthétique : dans le domaine de la teinture. Vers 1461, on découvre à Tolfa, près de Rome, un gisement d'alun. Ce sulfate double de potassium et d'aluminium hydraté permet de fixer la teinture des textiles. Il est aussi utilisé en mégisserie et en médecine. Grâce à ces améliorations, l'industrie textile se développe. Ainsi, les « Bonnetiers » de Troyes obtiennent le statut des confréries tricoteurs en 1505. Si l'invention même du tricot suscite encore quelques interrogations, les bas et les gants de soie, articles de grand luxe, ont les faveurs des souverains, notamment celles de Henry VIII, roi d'Angleterre depuis 1509.


G. DAGLI ORTI - MUSÉE DOBRÉE, NANTES

A CHACUN SON HEURE

Grâce à l'invention du ressort moteur, une lame d'acier enroulée en spirale et enceinte dans un tambour denté appelé barillet, l'horloge devient portative. Les premières apparaissent à l'époque de Louis XI. Partout en Europe, les techniques de l'horlogerie s'affinent. Au tout début du XVIe siècle en France, à Blois, la fabrication des montres relève de l'orfèvrerie. En Allemagne, l'horloger Peter Henlein réalise des montres de poche, de forme arrondie, longtemps connues sous le nom d'« œufs de Nuremberg ». Même si son fonctionnement est parfois hasardeux, l'horlogerie est promise à un bel avenir.

Les jardins sont à la mode

Premier jardin classique, la cour du Belvédère, au Vatican, conçue en 1503 par l'architecte Donato di Pascuccio d'Antonio, dit Bramante, relie le vieux palais au belvédère d'Innocent III. Outre ces jardins de type géométrique, on assiste aussi à l'émergence des jardins botaniques. Le plus ancien est situé près de Venise. Deux facteurs ont contribué à l'essor de la botanique : d'une part, l'étude des ouvrages de l'Antiquité grecque et latine, comme l'Histori Naturalis de Pline, imprimée en 1469 ; d'autre part, la découverte du Nouveau Monde qui introduit des plantes nouvelles. Potagers et vergers se multiplient. On y cultive des carottes, des betteraves, des artichauts, légume très prisé par les riches. Le melon, ramené d'Italie par Charles VIII, fait une entrée remarquée en France. Les fraises, framboises et groseilles que l'on cueillait à l'état sauvage occupent désormais une place de choix dans ces nouveaux jardins.

Les grands travaux

Les travaux de construction du canal de la Martesana débutent en 1457, sous la direction de Bertola da Novate. Ce canal doit relier Milan au lac de Côme. En France, le roi Louis XI (1461-1483), lance la construction d'un tunnel entre la France et l'Italie. Passant sous le Mont Viso, dans les Alpes, le tunnel, haut de 2,05 m, large de 2,47 m et long de 72 m, permettra le passage des mulets entre le Dauphiné et le marquisat de Saluces, dans le Piémont. Au siècle suivant, en 1517, François 1er, soucieux d'assurer la prospérité économique du Royaume, fait appel à l'Italien Bellarmato pour redessiner les plans du Havre. Son premier constructeur, Guyon Le Roy, en avait une conception trop désordonnée.

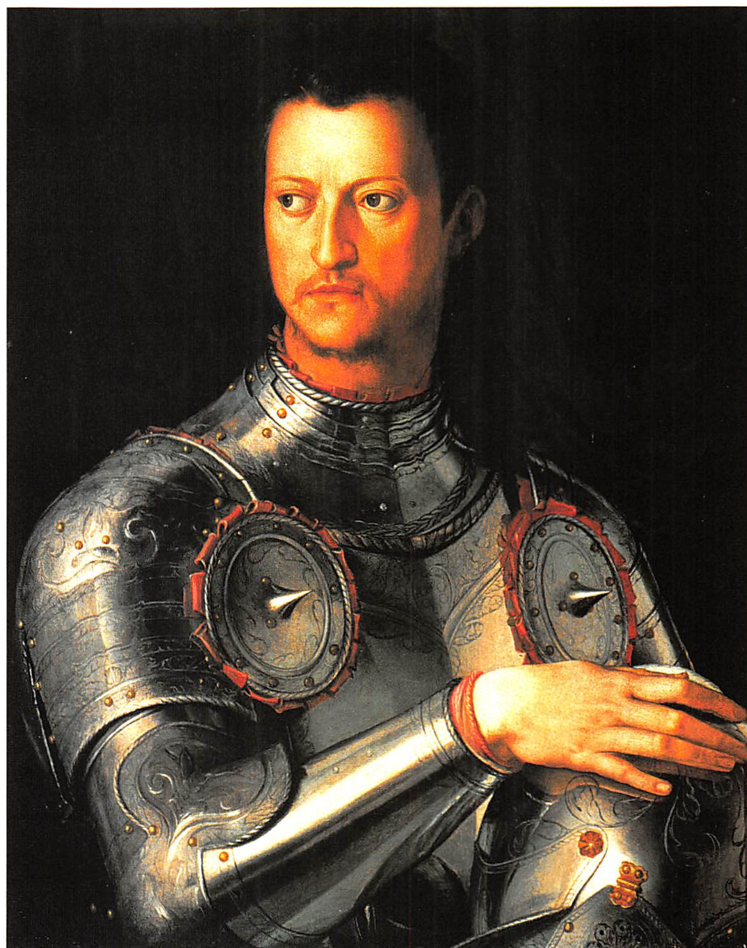

ADPC - ARTEPHOT

Bombardier, un métier à risque

Les premières bombes sont utilisées durant le siège de Bordeaux, en 1452. Fabriquées en Allemagne, elles sont perfectionnées par Jean Bureau, grand maître de l'artillerie du roi de France, Charles VII. Le traité de Valturio, *De re militari*, en 1472, fournit la première description de la bombe, un boulet creux rempli de poudre. A ses risques et périls, le bombardier allume la mèche quand la bombe est dans le tube. Puis, dans un deuxième temps, il enflamme la charge propulsive. Les éclatements sont si fréquents qu'un traité du canonnier du XVe siècle recommande au bombardier *« de craindre d'offenser Dieu plus que nul autre homme de guerre, car chaque fois qu'il fait jouer sa pièce, il est en danger d'être brûlé vif et de perdre la vie »*.

D'un canon, l'autre

En 1453, les canons de bronze, alliage de cuivre et d'étain, font une apparition remarquée lors du conflit opposant Mehmet II et Constantin XI à Constantinople. Assiégées, les vieilles fortifications de la ville ne résistent pas aux canons de l'armée de Mehmet II : d'un calibre de 75 cm, tirant des boulets de 587 kg, il faut 30 paires de bœufs et 450 hommes pour traîner un seul canon ! La poudre est alors composée d'un mélange de salpêtre, de soufre et de charbon de bois. A partir de 1480, le grenage, technique de classement des grains, permet d'obtenir une poudre à effet uniforme. La première armée moderne envahit l'Italie en 1495. Elle vient de France, où règne Charles VIII. Répondant à l'appel de Ludovic le More, contre son neveu, duc de Milan, le roi de France mène une campagne facile. Outre des véhicules d'artillerie plus stables, les Français disposent de canons nettement plus percutants. D'un bronze amélioré, montés sur affût, ils sont équipés de tourillons – pièces de métal fixées de chaque côté du canon vers le milieu de sa longueur – qui permettent de faire pivoter le canon.





AUNARI · GIRAUDON · GAL. DES OFFICES, FLORENCE

L'arquebuse défie les armures

En 1517, la première fabrique d'arquebuses ouvre ses portes à Saint-Etienne. Appelée aussi « bâton à feu » ou « canon à main », sa maniabilité augmente grâce à l'ajout d'une crosse fixée sur le tube. Dorénavant, un homme seul peut s'en servir. Mais son poids de 25 kg contraint l'artilleur à trouver un point d'appui. Il faudra attendre 1520 pour qu'apparaisse l'arquebuse munie d'une fourchette de support. Face au feu de cette nouvelle arme, l'armure n'offre guère de résistance. Pourtant, les princes et les nobles continuent d'en porter de magnifiques ornées des gravures de Donatello, Léonard de Vinci ou Michel-Ange.



ARTEPHOT - R. BENCINI

Les mathématiques pour tous

En 1494, l'« écriture à la vénitienne » n'est plus un secret italien. La *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalità*, de Luca Pacioli, vient de paraître, à Venise. Ce cours complet d'arithmétique commerciale explique la comptabilité à partie double : deux écritures égales et de signes contraires pour une même opération crédit-débit, appelée « écriture à la vénitienne ». Désormais, les futurs hommes d'affaires de toute l'Europe pourront l'étudier.



Summa de Arithmetica geometria. Proportioni : et proportionalita: Novamente impressa In Toscolano su la riva dil Benacense et unico carpionista Laco : Amenissimo Sito: de li antique et evidenti ruine di la nobil cita Benaco ditta illustrato: Cum numerosita de Impatori epithaphij di antique et perfette littere sculpiti dotato: et cum finissimi et mirabil colone marmorei: inumeri fragmenti di alabastro porphidi et serpentini. Cose certo lettor mio diletto oculata fide miratu digne sotto terra se ritrovano.

N° 4575.

Continentia de tutta lopera:

De numeri e misure in tutti modi occurrenti.
Proportioni e proportionalita a notitia del 5° de Euclide: e de tutti li altri soi libri.
Chiavi: overo evidentie numero. 13. per le quantita continue proportionali del 6° e 7° de Euclide extratte.
Tutte le parti de lalgorismo: cioe relevare partire: multiplicare: summare: e sotrare: con tutte sue prove in sani e rotti e radici e progressioni.
De la regola mercantesca ditta del. 3. e soi fondamenti con casi exemplari p c° m° f. G. guadagni: perdite: transportationi: e investite.
Partir: multiplicar: summar: e sotrar de le proportioni: e de tutte sorti radici.
De le tre regole del Catayn ditta positione: e sua origine.
Evidentie generali: over conclusioni numero. 66. absolvere ogni caso che per regole ordinarie non si podesse.
Tutte sorte binomij e recisi: e altre linee irrationali del decimo de Euclide.
Tutte regole de Algebra ditte de la cosa e lor fabriche e fondamenti.
Compagnie in tutti modi: e lor partire.
Socide de bestiami: e lor partire.
Fitti. pescioni: cottimi: livelli: logagioni: e godimenti.
Baratti in tutti modi semplici: composti: e col tempo.
Cambi real: secchi: fittitij: e diminuti: over communi.
Meriti semplici e a capo danno: e altri termini
Resti: saldi: sconti: de tempo e denari: e de recare a un di piu partite.
Ori: argenti: e loro affinare: e carattare.
Molti casi e ragioni straordinarie: varie e diverse a tutte occurrentie: commo nella sequente tavola appare ordinatamente de tutte.
Ordine a saper tener ogni conto: e scripture: e del quaderno in vinegia.
Tariffa de tutte usance e costumi mercanteschi in tutto el mondo.
Pratica e theorica de geometria: e de li cinque corpi regulari: e altri dependenti
E molte altre cose de grandissimi piaceri: e frutto: commo diffusamente per la sequente tavola appare.

J.L. CHARMET - BIBL. MAZARINE

Les prémices d'une défense nationale ?

Face à l'artillerie, les systèmes de fortifications sont à revoir. Selon Machiavel (Discours, Livre II, chap. XVII), *« il n'est aucune muraille si épaisse qu'elle soit, que ne puisse détruire l'artillerie en quelques jours »*. Mais c'est douter du génie des architectes militaires italiens. En premier lieu, ils adaptent les forteresses existantes : les tours et les murailles s'abaissent ; les murs s'épaississent, en particulier à la base pour résister aux bombes. Puis, ils imaginent un nouveau système de défense : des bastions quadrangulaires à intervalles réguliers. Giuliano Sangallo (1445-1516) et son frère Antonio (1455-1535) fortifient Civitacastellana, entre 1494 et 1497, en suivant un plan en as de pique. En 1515,

De l'art d'une gestion habile

A la tête de l'entreprise familiale Médicis, Cosme l'Ancien réalise de considérables profits. Son entreprise est à la fois banque, maison de commerces et centre de fabrication. En dehors de la maison mère, située à Florence, les Médicis possèdent plusieurs filiales en Europe. Bien que celles-ci soient juridiquement indépendantes, les Médicis possèdent toujours la majorité des actions. Ils contrôlent ainsi toute la gestion qu'ils confient à de jeunes cousins. En 1455, la Médicis de Londres livre 9 balles de laine défectueuses à un Milanais du nom de Ruffini, résidant à Bruges. Ce dernier porte alors plainte contre la Médicis de Bruges. Pour lui, les deux sociétés, bien que dans deux villes différentes, ne forment qu'une seule et même entreprise puisque étroitement rattachées à la maison mère. Mais sur la foi du témoignage d'un certain Tommaso Portinari, revendiquant, au nom de la Médicis de Bruges, la totale indépendance de sa société, le tribunal déboute Ruffini. En revanche, rien ne l'empêche de se retourner contre la Médicis de Londres...

Le triomphe du mulet

Issu du croisement entre l'âne et la jument, le mulet triomphe au XVIe siècle. Merveilleux moyen de transport, sobre et résistant, le mulet s'adapte tout particulièrement aux mauvaises routes de l'époque. François Rabelais (1494-1553) en fera l'éloge. « Mulets, bêtes plus puissantes moins délicates, plus durables au labeur que les autres ». Faut-il voir dans ce succès le signe avant-coureur d'un trafic terrestre en plein essor ?

Antonio réalise le premier tracé polygonal à Civitavecchia. Pour sa part, Leone Battista Alberti (1404-1472), dans son traité, *De re aedificatoria*, écrit en 1440 mais publié seulement en 1485, imagine une autre parade à l'artillerie : des fortifications défensives disposées en dents de scie et une configuration au sol en forme d'étoile.

UNE CERTAINE IDÉE DE LA VILLE

La population urbaine augmente partout en Europe. Malgré les onze épidémies de peste qui l'ont décimée entre 1407 et 1479, l'Italie connaît un essor particulier. Au début du XVIe siècle, Naples compte entre 150 et 200 000 habitants, Florence entre 60 et 100 000 habitants, Milan 120 000. Les architectes imaginent alors la ville idéale. Leon Battista Alberti rédige le premier traité d'architecture du monde moderne, *De re aedificatoria*, publié à Florence après sa mort, en 1485. Selon lui, la ville idéale doit respecter plusieurs critères. La commodité : *« Dedans la ville sera bienséant qu'aussi le chemin n'y soit tout droit, mais à la mode des rivières tournoyant doucement »* ; l'hygiène : *« Aux rues détournées où l'on ne hante guère, il faudra loger les métiers les plus puants comme tanneurs, corroyeurs et semblables »* ; la beauté : *« La cité ne doit pas se faire seulement pour la commodité et nécessité des logis mais aussi doit être disposée en sorte qu'il y ait de très plaisantes et honnêtes places »*. Ainsi, toutes ressemblances de la place Saint-Marc de Venise avec une cour de Palais n'est pas fortuite.

Épices : la fin du monopole vénitien


G. DAGLI ORTI BIBL. ESTENSE MODENE

En 1488, le navigateur portugais, Bartolomeu Dias découvre le Cap de Bonne-Espérance. La route des Indes et de l'Extrême-Orient est ouverte. Le 9 mars 1500, 13 vaisseaux, avec 1 200 hommes à bord, quittent Lisbonne, sous le commandement de Pedro Alvares Cabral. Il leur faut entre 4 et 8 mois pour rallier les Indes. Entre 1500 et 1520, les Portugais importent 10 000 tonnes d'épices, mettant ainsi fin au quasi-monopole de Venise. Cannelle, cardamone, curcuma, gingembre, girofle, muscade, piment, poivre, sel, envahissent les marchés. Chacun y trouve son compte. Les apothicaires utilisent leurs vertus médicinales. Les cuisiniers, eux, outre l'agrément des mets, trouvent ici le moyen de masquer le goût parfois trop faisandé des viandes.


ALINARI - GIRAUDON MUSÉE CORRER VENISE

(Carpaccio, *Les courtisanes*)

Un mal venu d'ailleurs

Le mal pestilentiel éclate en 1493. Neuf ans plus tard, il ravage l'Europe entière et les pays du bassin méditerranéen. La Chine est atteinte à son tour dès 1506-1507. Selon l'historien italien Sabellicus (1436-1506), 1/20e des humains sont atteints. La syphilis touche, en premier lieu, les classes riches et les ecclésiastiques. Devant la panique qu'elle engendre, on mène de nombreuses études pour en déterminer l'origine. Les Français l'appellent le « mal de Naples », les Italiens « le mal français », les Chinois « le mal portugais ». Girolamo Fracastoro (1478-1553), médecin humaniste et poète lui donne son nom définitif dans un poème resté célèbre, *Syphilidis, sive morbi gallici, libri tres*. Outre une description de la maladie, il conseille le traitement suivant : frictions de mercure et décoction quotidienne de bois de gaïac, récemment importé des Caraïbes, pendant un jeûne de 40 jours. La propagation rapide de la syphilis semble due à deux facteurs : les échanges maritimes et les mouvements de troupes, et la licence des mœurs. En 1509 en effet, on dénombre à Venise 11 654 prostituées pour environ 150 000 habitants. L'homosexualité, courante dans les milieux lettrés italiens, s'étend bientôt à toutes les couches de la population. Une libéralisation que certains trouvent excessive. Ainsi, à Florence, on encourage la prostitution féminine pour lutter contre le « vice grec ». A Venise, quiconque dénonce un inverti reçoit une prime de 300 ducas d'or.

L'avenir en question

Quand doit-on se marier, commencer un voyage, ou entreprendre une guerre ? Seuls les astrologues peuvent le prédire. Le destin régit la vie des grands de ce monde. Ainsi, Cornelius Agrippa (notre photo) jurisconsulte, médecin, astrologue et théologien, parcourt l'Europe au service de Louise de Savoie, mère de François Ier, roi de France. Le peintre et architecte-ingénieur italien, Baldassare Perruzzi, réalise dans la voûte de la grande salle de la Farnesine du marchand banquier Agostino Chigi, la carte du ciel de Rome, au jour de la naissance de ce dernier, le 1er décembre 1466. Le mathématicien et astrologue Johannes Müller, dit Regiomontanus, auteur de cinq livres sur les triangles, prédit, lui, la fin du monde pour 1588 !

J.L. CHARMET - BN





G. DAGLI ORTI - MUSÉE DU PRADO, MADRID

La chasse aux sorcières

En 1487, est publié le traité relatif à la sorcellerie, *Malleus maleficarum - Le Marteau des Sorcières* - des dominicains allemands, Henri Institoris et Jakob Sprenger. Ce dernier a été nommé inquisiteur général pour les diocèses de Cologne, Mayence et Trèves. Assimilant la sorcellerie à l'hérésie, et affirmant la compétence du tribunal inquisitorial, il est particulièrement chargé de la poursuite des sorciers. Cette chasse aux sorcières ne prendra fin qu'au milieu du XVIIe siècle.

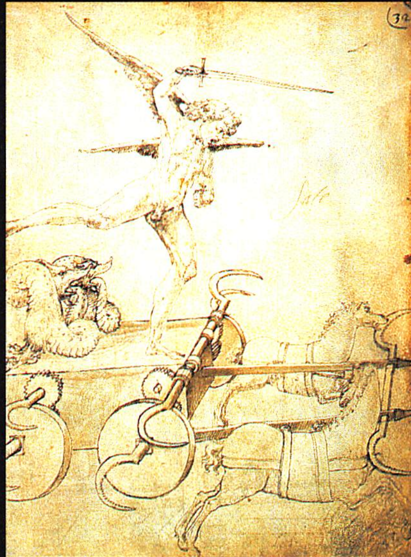
Un astre « pas comme les autres »

« Et au centre de toutes (les étoiles) se trouve le siège du soleil. Pourrions-nous en effet, dans ce temple d'une beauté sans pareil, placer le feu éternel ailleurs ou à un endroit meilleur que celui dont il peut tout éclairer en même temps ? » Inversant les rôles de la terre et du soleil, le premier texte de Nicolas Copernic, rédigé vers 1514, ne porte aucune signature. S'agit-il du Nicolai Copoernici de hypothesibus motuum caelestium a se constitutis commentariolus, dont fait état Matthias de Miechow, professeur à l'université de Cracovie, dans le catalogue de sa bibliothèque personnelle ? Dans ce texte, connu plus tard sous le nom de Commentariolus, Copernic expose son système en 7 postulats. Dans le sixième, il affirme que *« les mouvements qui nous paraissent appartenir au soleil ne proviennent pas de lui mais de la terre et de notre orbe, avec lequel nous effectuons des révolutions autour du soleil comme n'importe quelle autre planète. Ainsi donc, la terre est entraînée par plusieurs mouvements. »*

MACHIAVÉLIQUE

Le 9 avril 1513, Niccolo Machiavelli s'adresse à Francesco Vettori : *« La fortune a voulu que, ne sachant raisonner ni sur l'art de la soie ou de la laine, ni sur les profits et les pertes, j'en vins à comprendre qu'il me revenait de raisonner sur l'État. »* Tirant parti des leçons des Anciens et de sa propre expérience, Machiavel expose au Prince Laurent le Magnifique son art de la politique, dans son célèbre ouvrage, *Il Principe* (Le Prince). Il y décrit une méthode de gouvernement essentiellement pratique. Achevé en 1513, *Il Principe* sera publié en 1516.

Le Temps des Ingénieurs



Ils sont d'abord artistes - peintres, sculpteurs, ou orfèvres. Inspirés par les Anciens, ils se font architectes, mais aussi ingénieurs et mécaniciens. Dans l'Italie prospère de ce *Quattrocento*, ils sont appelés au service de princes ou de seigneuries urbaines. Pour eux, ils conçoivent des machines de guerre, trouvent les moyens de détourner un fleuve, de renforcer des fortifications... Et leurs inventions, ils les consignent dans des carnets de dessins.

À l'ombre des pri



nces et patriciens



MANTEGNA, LOUIS III DE GONZAGUE ET SA COUR. PHOTO ALINAR - GIRAUDON.

Dans l'Italie prospère du Centre et du Nord, principautés et républiques vivent en rivalité constante. Pour rehausser leur prestige et assurer leur prépondérance, les pouvoirs en place font appel aux spécialistes. Ingénieurs et artistes affluent ainsi dans des capitales qui s'affirment peu à peu comme autant de centres culturels et scientifiques rayonnants.

Par Alberto Tenenti

A la fin du Moyen Age, les intellectuels et les spécialistes, les doctes aussi bien que les techniciens n'appartenant pas au clergé, s'il leur arrive de bénéficier d'un statut juridique, n'évoluent pas dans des milieux économiquement ou socialement autonomes. Les différents types d'artisans sont certes réunis dans des corps de métiers, mais la place réservée aux activités non manuelles – celles, par exemple, des cambistes, notaires, juges ou médecins – est fort réduite. Le premier problème auquel sont donc confrontés ceux qui veulent exercer des professions associant la théorie et la pratique est celui de leur insertion.

Bien que les seigneurs et la plupart des magistrats des villes aient sans aucun doute grand besoin de leurs services et de leurs œuvres, il est très rare qu'ils les embauchent à demeure et, plus encore, qu'ils leur accordent un statut propre. Architectes, ingénieurs ou techniciens de toutes sortes sont donc conduits à changer très souvent d'emplois et à faire montre de leurs talents dans les domaines les plus variés. Un technicien peut être appointé par l'administration d'une ville à l'entretien de l'horloge publique, mais il ne peut que rarement en vivre. Quant au fabricant d'horloge, il est encore moins en mesure de subvenir à ses besoins grâce à ses compétences. La situation des hommes de lettres n'est au demeurant guère différente : s'ils n'appartiennent pas au clergé, il leur faut se convertir en maîtres d'école, fonctionnaires des chancelleries, ou pamphlétaires.

Les débouchés faciles et assurés font donc défaut, mais les véritables lieux de formation aussi. Pour apprendre, il faut trouver un spécialiste expérimenté et compétent qui accepte de transmettre son savoir au jeune. Or, ce dernier, non seulement n'a pas accès aux éventuels écrits du maître, mais il doit, de surcroît, s'en remettre à sa propre intuition pour acquérir des secrets que le maître, s'il est vraiment compétent, se garde bien de lui livrer. Enfin, ceux qui passent commandes et attribuent les travaux sont bien souvent incapables d'évaluer les véritables capacités de tel ou tel technicien. Dans un monde où un médecin n'est presque jamais en mesure d'offrir un service fiable, il n'y pas à s'en étonner.

Pourquoi le rappel de ces quelques données ? Pour mieux faire comprendre qu'à la fin du Moyen Age, le recours aux compétences techniques est grandement soumis à l'à-peu-près ; de tous côtés, l'on tâtonne. Dans certains milieux, cependant, les capacités individuelles et les réputations professionnelles trouvent plus facilement à s'affirmer : les églises et les monastères d'un côté, les cours princières et les différentes magistratures urbaines de l'autre. En d'autres termes, les centres de pouvoir réel exercent une attraction inévitable sur les architectes, ingénieurs et inventeurs. Les demandes que ces derniers sont amenés à satisfaire émanent donc davantage de collectivités ou de gouvernements que de particuliers, hormis une poignée de riches citadins ou de grands seigneurs féodaux.

Il ne faut, d'autre part, pas s'étonner que l'aire la plus favorable à l'éclosion de remarquables spécialistes et à la stimulation de leur talent soit circonscrite à l'Italie du Centre et du Nord. Dans l'Europe des XIVe et XVe siècles, cette zone, qui s'étend en gros des Alpes à Rome, constitue, en effet, une exception. Sur une superficie somme toute moyenne, on ne compte pas moins d'une douzaine d'Etats indépendants ou largement autonomes. Cette moitié de la péninsule, à l'époque déjà beaucoup plus développée que le royaume de Naples, la Sicile et la Sardaigne, est très riche. Située au cœur des échanges internationaux les plus rentables, elle jouit, de surcroît, d'une agriculture de premier ordre.

A la fin du Moyen Age, ni la France, ni l'Espagne, pour ne citer que ces deux pays, ne forment des Etats unifiés et soudés. Leur vaste territoire n'abrite cependant qu'un nombre très limité d'entités politiques différentes. Le cas de l'Italie du Nord et du Centre se dis-

tingue également de celui de l'Allemagne, où les nombreux centres régionaux remarquables sont sans véritable indépendance politique. Un autre facteur renforce la situation géographique privilégiée de la Toscane et de la vallée du Pô : l'absence d'une dynastie nationale, et même d'une quelconque puissance unificatrice, favorise l'apparition et l'enracinement de nombreuses seigneuries, principautés ou républiques. Si elles sont rivales, aucune n'est en mesure d'absorber ou d'éliminer les autres, du moins les plus puissantes d'entre elles.

C'est donc là, au milieu d'un archipel urbain, qu'une dizaine de capitales vont affirmer leur prépondérance et s'ériger en autant de centres culturels et artistiques remarquables. Chacune œuvre pour rehausser et imposer son prestige, aussi bien qu'accroître son rayonnement et sa domination. Au début du XVe siècle, le nombre des entités politiques ayant constitué l'Italie du Centre et du Nord au cours du demi-siècle précédent, diminue. Sous les coups de boutoir du duché de Milan et des républiques de Venise et de Florence, les Scaligeri de Vérone, les Carrara de Padoue et la seigneurie de Pise perdent leur indépendance, vers 1400. A côté des villes principales, certaines autres parviennent à maintenir leur première importance : toutes disposent de solides moyens financiers et doivent satisfaire des exigences civiles et culturelles spécifiques.

L'existence d'un centre autonome de pouvoir politique, qu'il soit princier ou républicain, constitue sans aucun doute un atout majeur tant pour la cité que pour tous ceux qui souhaitent lui offrir leurs services. Ambitions économiques ou territoriales s'allient d'autant mieux aux besoins culturels ou technologiques que les unes renforcent les autres. Bien que peu meurtrières, des guerres émaillent en effet continuellement les rapports entre ces Etats du Centre et du Nord.

Ces conflits, cela va de soi, conduisent les princes ou les seigneuries urbaines à faire appel aux ingénieurs. A ces derniers, on demande aussi bien de détourner le cours d'un fleuve, de renforcer les fortifications ou de miner celles de l'adversaire que de mettre au point des armes plus destructrices ou

Des conflits armés émaillent les rapports des Florentins et des Siennois. Paolo Uccello illustre pour le compte des Médicis, *La bataille de San Romano* (1456-1460).





ARTEPHOT - NIMATALLAH. VATICAN PINACOTHÈQUE

Souverain prestigieux, le pape règne en maître sur Rome. Les ressources financières dont il dispose lui permettent de faire appel à un grand nombre d'artistes. (Sixte IV, par Da Forli)

de concevoir des bateaux plus performants. D'ailleurs, si les artistes italiens se déplacent d'un centre à l'autre en fonction des commandes qui leur sont adressées, les techniciens sont rarement animés par le patriotisme et vendent leurs services au plus offrant.

Au cours du XVe siècle, la situation politique de l'Italie du Centre et du Nord évolue : le pouvoir est davantage exercé par des seigneurs que par des régimes républicains. Ces derniers résistent encore, tant bien que mal, à Gênes, à Sienne et à Lucques. Mais les princes dirigent la plupart des gouvernements de la Péninsule.

Venise et Rome constituent deux cas particuliers. A Venise, les instances sont collégiales mais sous l'égide d'un chef prestigieux, nommé à vie, et considéré presque comme un souverain. Ce doge, issu de l'une ou l'autre des grandes familles de l'aristocratie, cherche à valoriser son action personnelle. A Rome, le souverain pontife règne en maître, notamment à cette époque où sévit le népotisme et où chaque pape favorise ouvertement les membres de son propre lignage (parfois même ses enfants).

De tous les princes italiens de la Renaissance, le pape est certainement le plus prestigieux. Il dirige un gouvernement fort bien structuré et dispose de considérables ressources financières. A l'exception des deux papes aragonais de la famille Borgia – Calixte III (1455-1458) et Alexandre VI (1492-1503) – tous les autres, à partir du Concile de Constance (1417), sont italiens. Loin d'être austères ou d'ascendance sociale modeste, ces prélats appartiennent à de grandes maisons. Le cardinalat est en effet souvent l'apanage des familles princières de la Péninsule. On comprend ainsi l'attrait



GIRAUDON, MUSÉE DE L'ACADÉMIE, VENISE

de ces pontifes pour le faste et les fêtes, l'art et l'architecture, mobilisant, à cet effet, un grand nombre de spécialistes. Enfin, à partir de Nicolas V (1447-1455), les papes cherchent à rehausser l'image de Rome. Ils font restaurer ses monuments, ouvrir de nouvelles artères au cœur de la ville et ériger des édifices magnifiques.

Alors que les papes aiment trôner au milieu d'une cour splendide et très fréquentée, les doges vénitiens doivent, eux, se montrer plus modestes dans leur train de vie, tout en occupant la place d'honneur dans toutes les cérémonies et les pompes publiques. Ils suivent aussi de très près toutes les questions touchant à la vie religieuse, culturelle et même populaire de Venise : leurs avis comme leurs choix pèsent beaucoup en pareilles matières. La Sérénissime étant particulièrement soucieuse du renforcement de sa flotte, le doge et ses conseils contrôlent en permanence les activités de l'Arsenal. On ne se contente pas d'y construire des bateaux de guerre, mais aussi tout ce qu'il faut pour leur armement, jusqu'aux canons. Trois mille personnes environ y travaillent, dont de nombreux spécialistes de haut vol.

Le site même de Venise exige, par ailleurs, des compétences particulières pour la réglementation des eaux de la lagune, l'affermissement des sols

Les doges vénitiens veillent autant sur le rayonnement culturel de leur Etat que sur le renforcement de sa flotte. (Vittorio Carpaccio, *La légende de sainte Ursule*).



GIRAUDON, MUSÉE DE L'ACADÉMIE, VENISE



ARTEPHOT - R. BENCINI



NIMATALLAH - ARTEPHOT

et les fondations des édifices. Le régime aristocratique favorise en effet l'essor de grandes fortunes familiales. De nombreux patriciens tiennent donc à afficher le lustre de leur lignage en se faisant bâtir des palais imposants, en achetant des œuvres d'art ou en en confiant la réalisation à des maîtres réputés. Un phénomène tout à fait analogue se produit à Florence, ville républicaine, où toutefois, prend pied le pouvoir assez personnel et ensuite quasi seigneurial de deux maisons : celle des Albizzi (de 1383 à 1434) et celle des Médicis (de 1434 à 1494). Là, comme à Venise, les commandes des différentes œuvres d'art, aussi bien que l'organisation de fêtes, de spectacles et de cérémonies publiques ne sont pas uniquement du ressort de leurs deux gouvernements mais aussi des corps de métiers les plus puissants, des confréries, et naturellement du clergé.

Il ne faut donc pas identifier les mécènes de l'Italie du XVe siècle aux seuls princes. Ces derniers, certes, dès lors que leurs finances le permettent, ont un intérêt encore plus explicite que les patriciens ou les prélats à s'illustrer sur la scène de leur capitale. Tous ne sont pas, comme les Sforza de Milan ou les Montefeltro d'Urbino, des parvenus. Mais aucun ne jouit d'un charisme particulier, aucune dynastie italienne n'étant au pouvoir de longue date ni auréolée d'une absolue légitimité. Les Visconti de Milan, les Este de Ferrare, les Gonzague de Mantoue, les Malatesta de Rimini, etc. n'ont pas d'ascendance plus noble que la plupart des lignages. Ils ont pris le pouvoir par l'astuce ou la violence et l'exercent par la force. Ces marquis et autres ducs affichent une ambition à la mesure de l'énergie avec laquelle ils

Dans la république de Florence, Cosme de Médicis cultive autant le mécénat que le pouvoir personnel. (Botticelli, *Adoration des mages*)


GIRAUDON, MILAN

A Milan, Ludovic Sforza, descendant d'une famille de condottieri, s'est emparé du pouvoir à la mort de son neveu. Protecteur des arts, il est le premier hôte de Léonard de Vinci.

tiennent les rênes de leurs Etats. Les rapports personnels qu'ils entretiennent avec ceux qu'ils emploient, même provisoirement, sont souvent directs, voire intimes. Leur cour, moins solennelle que celle des papes, s'apparente à une grande famille où se nouent des rapports assez ouverts et souples. Peintres, architectes, ingénieurs deviennent assez aisément les amis d'un Cosme de Médicis ou d'un Laurent le Magnifique, son petit-fils. Ainsi, ces chefs d'Etats, pour la plupart condottieri, vivent et se comportent comme des *pater familias* à l'égard de ceux qu'ils engagent pour leurs compétences techniques. On revient donc à ce que nous évoquions dès le départ : une relation personnelle s'établissait entre les différents spécialistes appointés d'une part, et les plus hauts magistrats ou les princes d'autre part. D'ailleurs ces derniers, cultivés et amateurs d'art, estimaient autant leur fauconnier que leur architecte et leur payaient le même salaire.

Dans la compétition qui les oppose, les princes et les républiques de l'Italie du Centre et du Nord s'en remettent aux différents spécialistes. Ils stimulent et mettent en valeur tous ceux qu'ils jugent aptes à rehausser leur prestige. Chaque capitale devient une vaste scène de théâtre. On y érige des bâtisses monumentales. Sur les places et dans les rues, on prend plaisir à organiser des processions, des défilés solennels, des carnavals et des jeux. Chacun veut tenir son rang, parader en public en costume d'apparat. Le goût du luxe va de pair avec le raffinement de toute une société. La recherche du spectaculaire appelle les talents capables de le produire, depuis l'orfèvre ou le peintre jusqu'à l'ingénieur et à l'inventeur de machines. ■

PEINTRES, SCULPT

Qu'il s'agisse de Brunelleschi ou de ses successeurs, le parcours type d'un ingénieur de la Renaissance est souvent le même : il entre très jeune en apprentissage dans un atelier d'orfèvre-sculpteur, puis il redécouvre par lui-même le savoir technique des Anciens, tout en cherchant à le rationaliser.

PAR DANIELA LAMBERINI

Pour l'historiographie moderne, le fait que la culture des machines caractérise la Renaissance italienne, constitue une récente découverte. Jusqu'aux études de Bertrand Gille, vers 1960 (voir l'article d'H. Vérin, p 82), la Renaissance n'est que cet extraordinaire mouvement qui, dans le sillage de la redécouverte des textes classiques et des œuvres des Anciens, a vu resurgir les beaux arts : peinture, sculpture, architecture et littérature, ont alors atteint des sommets, jamais plus égalés pour certains.

La redécouverte et le renouveau des techniques, la naissance de ce que nous définissons aujourd'hui comme la culture scientifique et technique, est toujours restée dans l'ombre. Pourtant, qui d'autre que l'artiste de la Renaissance incarne mieux cette culture, intimement liée au concept d'« *homo universalis* » ? Il aura fallu attendre ces toutes dernières années, avec les remarquables expositions de Sienne, Venise, puis Paris, pour que les travaux et la pensée des ingénieurs de la Renaissance soient présentés à un vaste public.

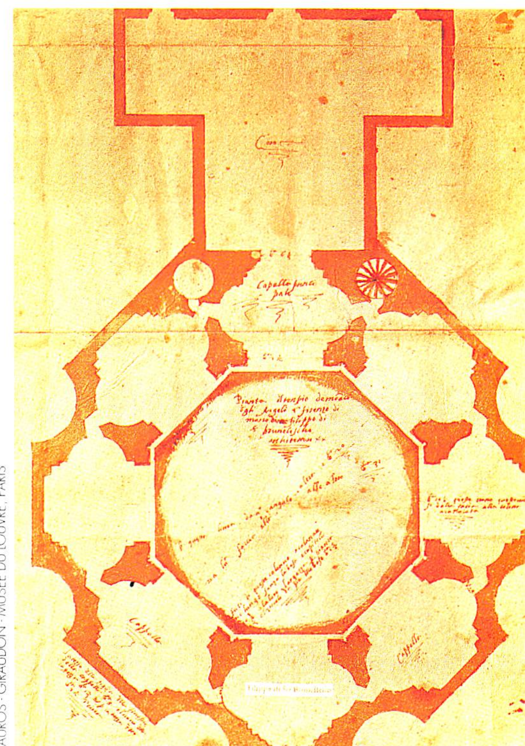
Le parcours de Léonard, nous le verrons, rejoint celui des artistes ingénieurs de son époque. La voie demeure la même pour tous : engagement pragmatique dès le plus jeune âge, apprentissage traditionnel et pratique quotidienne dans des *bottega*. Quant à l'étude individuelle, elle mène chacun à la redécouverte philologique des textes classiques. Dépourvus d'illustrations, souvent obscurs dans leur version archaïque du Moyen Age, ceux-ci doivent être interprétés et corrigés.

Tradition et innovation constituent donc les deux pôles de cette période, qui s'étend de la fin du XIVe au début du XVIe siècle. La découverte, la requalification et la rationalisation de la technologie et du savoir technique des Anciens révolutionnent la culture. Le florentin Filippo Brunelleschi (1377-1446), en est l'archétype et interprète absolu.

BRUNELLESCHI, L'INNOVATION ARCHITECTURALE

Homme universel typique de la Renaissance, Filippo Brunelleschi débute sa carrière d'artiste comme orfèvre et sculpteur. Il devient ensuite architecte, ingénieur et constructeur de machines. Mais c'est à la réalisation de la coupole de Santa Maria del Fiore, le Dôme de Florence, qu'il doit son renom. Ces 16 années de chantier, de 1420 à 1436, un temps exceptionnellement court comparé à la difficulté de l'entreprise, constituent un réel exploit de la technique de la Renaissance.

Véritable « machine » architecturale, la coupole s'élève à 35,5 mètres au-dessus du tambour. Sa base se situe à environ 55 mètres du sol, et une distance équivalente sépare deux angles opposés de l'octogone de base. La hauteur totale, lanterne comprise, atteint



URS ET INGÉNIEURS

107 mètres, dominant ainsi le panorama de la ville. Jusqu'à ce jour, aucune construction n'est venue obscurcir ce superbe îlot, édifié en plein cœur de la ville.

Sa réalisation a néanmoins suscité quelques polémiques. A l'époque, les habitants de Florence affichaient un certain scepticisme. En effet, s'il s'inspirait des techniques romaines et islamiques, Brunelleschi révolutionnait les systèmes traditionnels de construction. Il éleva la coupole « sans cintres », supprimant ainsi les armatures soutenant la maçonnerie.

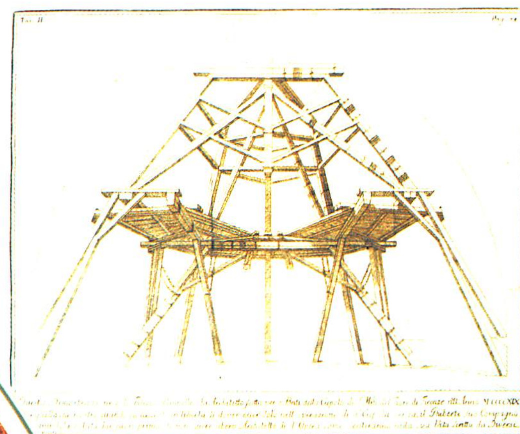
Formée de huit pans, la très élégante voûte ogivale comporte une double coque, interne et externe. Ceci permet de créer des points d'appui supplémentaires et d'empêcher toute infiltration d'eau. Les briques de la voûte, de formes différentes et posées une à une, sont disposées en « arête de poisson » pour donner une solidité maximale à la structure.

Organisé selon des règles strictes, le chantier de la coupole nécessita des techniques à la mesure de sa complexité. Les matériaux employés pour la construction, d'un poids total de 37 000 tonnes, impliquaient en effet des moyens de transport et de levage inédits.

Sur des échafaudages suspendus dans le vide, les ouvriers firent ainsi transiter quelque quatre millions de briques, des pierres façonnées, d'imposantes plaques de marbre servant à ériger les nervures, et la lanterne, en marbre blanc de Carrare.

L'audace des solutions adop-

Commencée en 1420, la réalisation de la coupole de Santa Maria del Fiore, lanterne exceptée, s'achève seize ans plus tard. Elle n'aura nécessité l'emploi d'aucun cintre de bois pour supporter la maçonnerie (ci-dessous la reconstitution des échafaudages intérieurs par Giovan Battista Nelli). Chacun de ses huit pans (visibles sur le plan de Brunelleschi) est soutenu par une trame de nervures verticales et d'arcs transversaux (des ouvertures, dans la maquette contemporaine de F. Gizdulich, les font apparaître).



MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES, FLORENCE

GIACOMO BRETZEL


GIACOMO BRETZEL

Formée de coques interne et externe, la coupole possède des lits de maçonnerie superposés. Bien qu'inclinées vers l'intérieur, les briques, alignées en arêtes de poisson, ne peuvent pas glisser.

tées pour cette entreprise, l'ingéniosité des machines inventées et construites par Brunelleschi pour élever et suspendre de telles masses, font de ce chantier la plus grande école technique de son temps.

Ultérieurement, divers auteurs vont tenter de reproduire certaines des machines brunelleschiennes. Qu'ils soient florentins, comme Bonaccorso Ghiberti, Giuliano da Sangallo, Leonard de Vinci, ou siennois, comme Francesco di Giorgio et Taccola, tous vont s'inspirer des projets novateurs de ce grand artiste. Ainsi, F. di Giorgio reproduit de nombreuses versions des treuils et grues brunelleschiennes dans son *Codicetto* [1] et dans ses traités d'architecture et de génie militaire.

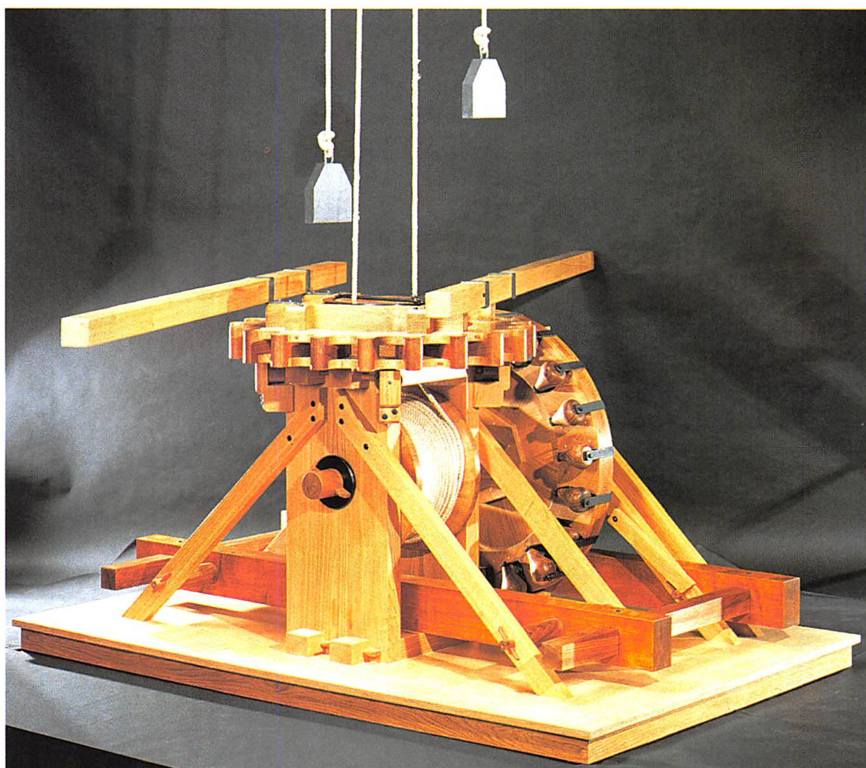
S'adressant à Taccola, Brunelleschi aurait dit : *« Ne laisse jamais les autres participer à tes inventions »*. Dans une attitude typique de la mentalité médiévale, l'architecte florentin, perpétuant l'obligation de secret propre à la *bottega,* n'a en effet jamais divulgué ses propres inventions. En se refusant à livrer la moindre information sur le dessin de ses machines, il pensait les protéger de l'incompétence et de la mauvaise foi de ses adversaires malveillants. Ce qui explique que les reproductions de ses machines, par ses contemporains et successeurs, soient très fréquemment simplifiées, voire erronées.

DES SUCCESSEURS BIEN INSPIRÉS

A Florence, le principal promoteur et interprète de l'héritage brunelleschien se nomme Bonaccorso Ghiberti. Il est le neveu du célèbre adversaire de Brunelleschi, le sculpteur Lorenzo Ghiberti. Son *Zibaldone,* écrit dans les années 1472-1483, abonde de croquis des machines employées sur le chantier de la coupole. Y figurent notamment les « cholle », ces appareils de levage qui, pendant plus de dix ans, seront montés et manœuvrés à des hauteurs vertigineuses, suscitant stupeur et admiration. Ceux-ci combinent, avec une géniale précision, les moyens élémentaires offerts par la mécanique traditionnelle d'alors. Elle résulte elle-même de l'association des machines rudimentaires des Anciens - levier, roue, voussoir, poulie, vis et plateau incliné - mues par une force motrice humaine et animale.

Dans le *Zibaldone* de Ghiberti, nous retrouvons le fameux treuil léger, utilisé pour monter la lanterne de la coupole, en 1443. Ghiberti a pu en observer l'assemblage sur le chantier. En

Utilisé pour mettre en place la lanterne, le treuil léger de Brunelleschi (dessiné par Ghiberti), possède une roue verticale dont les dents à rouleau tournant (*palei*) réduisent les frottements.

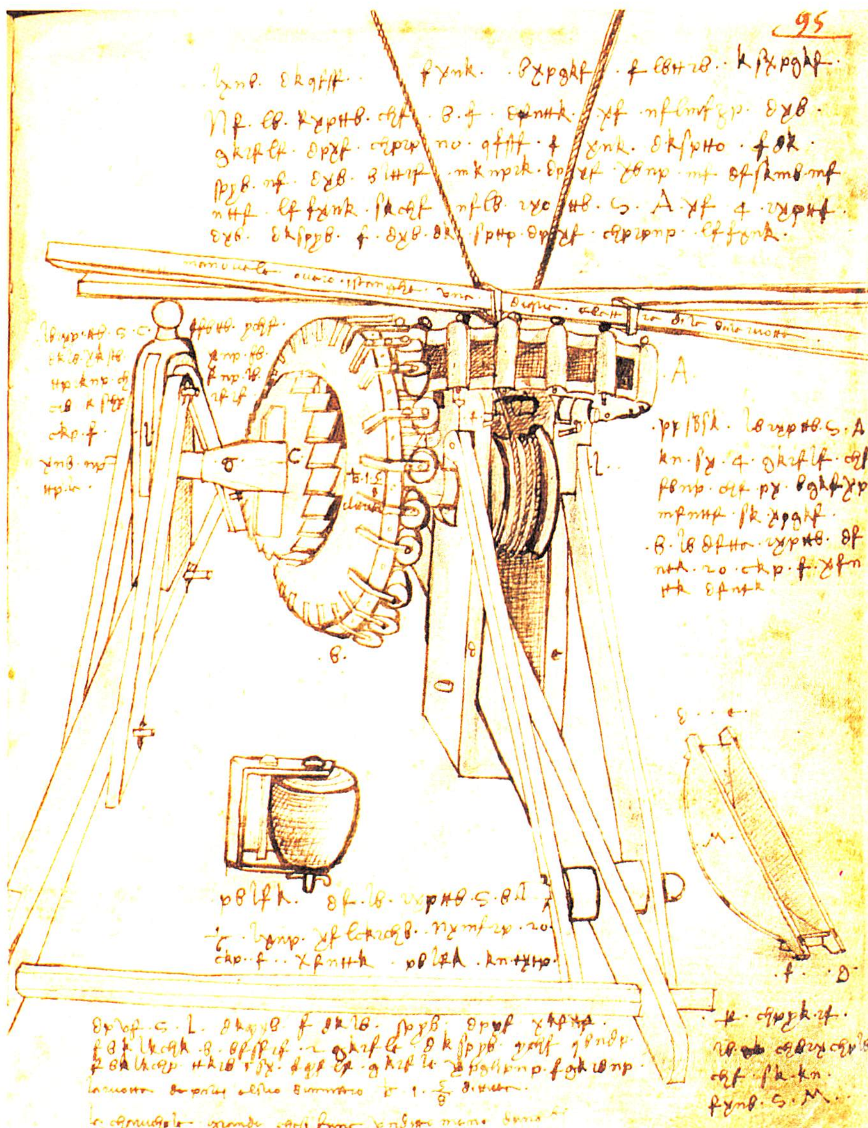

MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES, FLORENCE

1 - Il est aujourd'hui conservé à la bibliothèque du Vatican.

forme d'arc, de dimension modeste, ce treuil possède un rendement permettant de réduire la vitesse de poussée d'environ 50 %. L'innovation de Brunelleschi réside principalement dans l'utilisation de « palei ». Ces instruments de transmission sont des dents d'engrenage à rouleau tournant. Doté d'un pivot le long de son axe longitudinal, le « paleo » tourne librement sur lui-même tout en étant solidement fixé à la roue par des axes métalliques. Ainsi, le frottement induit par le glissement lors de la transmission du mouvement, d'une rotation à l'autre, se trouve considérablement réduit.

Dans son ouvrage, Ghiberti décrit le montage de chacune des grues pivotantes mises en œuvre pour la construction de la lanterne, finie après la mort de l'architecte. L'une d'elles fut utilisée pour achever l'oculus, en 1465. Disposée à l'intérieur de la coupole, elle pivote de 360° sur sa base fixe. Pour la maintenir dans son axe vertical, la charge - principalement d'imposants blocs de marbre - et son contrepoids, sont déplacés simultanément en sens contraire.

Ces machines brunelleschiennes seront reproduites par Léonard de Vinci dans son *Codex atlanticus*.



MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES, FLORENCE

Notons à ce propos une différence notable entre les deux hommes. Les croquis de Léonard sont d'une extraordinaire précision technique, respectant fidèlement les constructions originales. Ceux de Ghiberti, plus spectaculaires, sont souvent approximatifs, laissant deviner certaines lacunes dans la compréhension des détails de construction. L'héritage brunelleschien est-il si lourd à porter ? Giuliano da Sangallo (1445-1516) semble pourtant s'en être accommodé.

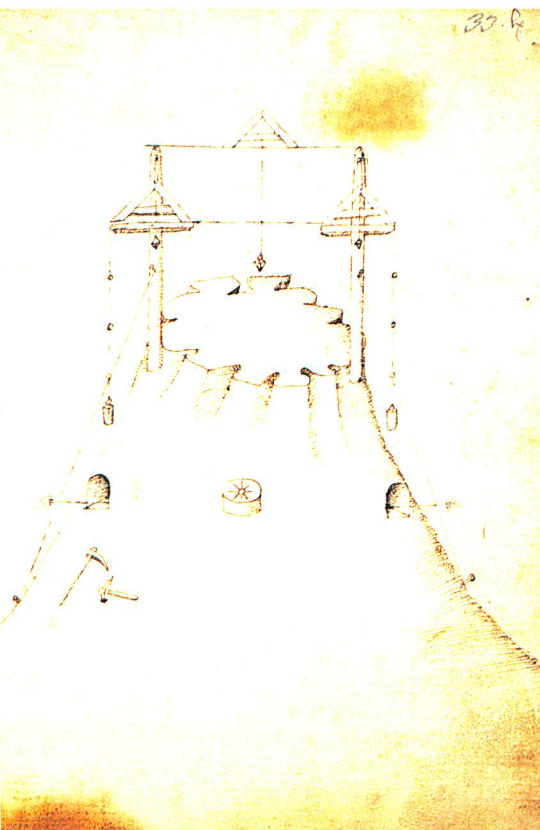
Architecte, ingénieur militaire et sculpteur, ce florentin est l'un des plus grands disciples de Brunelleschi. Outre une description de la première grue de la lanterne - montée en 1444 - les pages de son *Carnet siennois* foisonnent de croquis des tendeurs à vis de type brunelleschien. Ceux-ci permettaient de mettre en place avec précision les imposants éléments de la structure (2).

Nul ne s'étonnera que les pages du *Carnet siennois* de Giuliano da Sangallo aient été recopiées par ses neveux, les frères Giovan Battista, il Gobbo et Antonio il Giovane. Ces carnets, typiques de la *bottega*, servent d'aide-mémoire aux artistes ingénieurs de la Renaissance. Ils leur permettent de déterminer leurs sujets d'étude et de réflexion. Et surtout, ils lèguent aux générations suivantes, les secrets, les inventions et les expériences acquis.

L'Archimède de Sienne

Si à Florence, les *bottega* « filtrent » la transmission des connaissances, dans la république limitrophe et rivale de Sienne, il en est autrement. La présence de Mariano di Jacopo, dit Taccola, contemporain de Brunelleschi et mort dix ans après lui, n'y est pas étrangère. Il incarne, à lui seul, la naissance et le développement d'une

2 - Certains d'entre eux sont conservés au Musée Opera di Santa Maria del Fiore, à Florence, où l'on trouve aussi de nombreuses louves (leviers) et moufles (assemblage de poulies) de diverses dimensions, des pinces de fer, pinces auto-serrantes, toutes en référence au chantier brunelleschien.



Sienne étant à l'écart des cours d'eau, ses ingénieurs s'orientent vers l'hydraulique : ils conçoivent un réseau d'aqueducs long de 25 km (ci-dessus, percement de galeries de pente constante, de Taccola). La guerre les concerne tout autant. Et Taccola fait preuve d'ironie : pour atteindre sa gamelle, son chien tire la cloche, laissant ainsi croire que la forteresse est occupée (à droite, reproduit par P. Santini).

approche différente du savoir technique et scientifique, caractéristique de son temps.

Surnommé par ses concitoyens l'Archimède de Sienne, en raison de ses prodigieux talents d'inventeur, Taccola est d'abord notaire avant de devenir artiste et dessinateur. S'exprimant en latin, ses ouvrages abondent de citations d'auteurs qu'il côtoie.

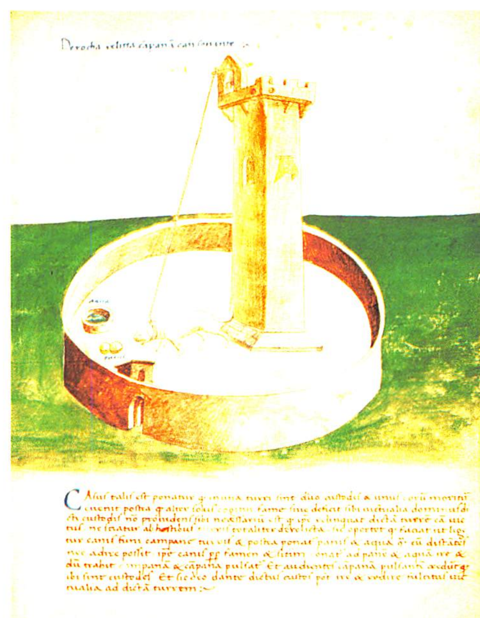
S'il ne peut rivaliser avec l'indiscutable supériorité du milieu culturel de Florence, celui de Sienne est riche de personnalités illustres. Et les bibliothèques humanistes de la ville regorgent des trésors de la culture classique. En outre, les séjours siennois de princes, comme le Duc de Calabre, et le Duc d'Urbino (voir l'article d'A. Tenenti, p 36), contribuent largement à promouvoir les études d'ingénierie.

Dans cette cité toscane, les artistes ingénieurs de la Renaissance accordent une attention particulière à l'ingénierie militaire et hydraulique. C'est ainsi que l'orgueilleuse Sienne, rivalisant avec les réalisations mythiques des Anciens, va se doter de l'un des plus extraordinaires réseaux d'aqueducs d'Europe, long de 25 kilomètres, les « *Bottini* ». Sa réalisation, commencée au XIII[e] siècle, ne s'achève qu'au siècle suivant. Son entretien, constant, va occuper des générations de techniciens et spécialistes en hydraulique.

C'est donc tout naturellement que Taccola s'oriente vers l'ingénierie hydraulique. Les nombreuses inventions qui paraissent dans ses traités sont souvent surprenantes. Fruits d'une fantaisie effrénée et ironique, elles sont mêlées de symbolisme et d'allusions. Ceux-ci, à l'évidence, trouvent leurs racines dans le passé médiéval.

Regroupées par thèmes, ses inventions visent à résoudre des problèmes complexes et variés d'hydraulique. Ses fontaines à surprise, pompes et siphons prendront place dans les « *Bottini* ». Ses navires à pales et ses barges ingénieuses permettront à de lourdes charges de traverser les bassins. Ses combinaisons de scaphandriers et ses dragues seront utilisées pour récupérer les précieuses cargaisons régulièrement perdues en mer.

Outre les questions d'hydraulique, Taccola s'intéresse aussi au problème de la production d'énergie (voir l'article de G. Comet, p 51). Il aborde également les techniques de l'arpentage, en fournissant des instruments de nivellement et de mesures. Enfin, comme ses successeurs, Francesco di Giorgio en tête, il va s'attaquer aux questions particulières de l'art de la guerre. Le dessin du « *chien sonnant* » illustre l'ironie et la simplification, toute théâtrale, dont il peut faire preuve en pareil cas...



Dans le domaine des fortifications, nombreuses sont les innovations consécutives à l'utilisation de la poudre à feu et aux nouvelles stratégies militaires. L'Archimède siennois, là encore, laisse libre cours à son imagination débordante, bien que celle-ci demeure empreinte des modèles classiques, notamment des textes de Valturio. Chevaliers cuirassés, chars d'assaut de nuit, anges exterminateurs montés sur des chars équipés de faucilles tournantes, ponts levis, échelles mobiles articulées, Taccola adapte ses inventions à son époque.

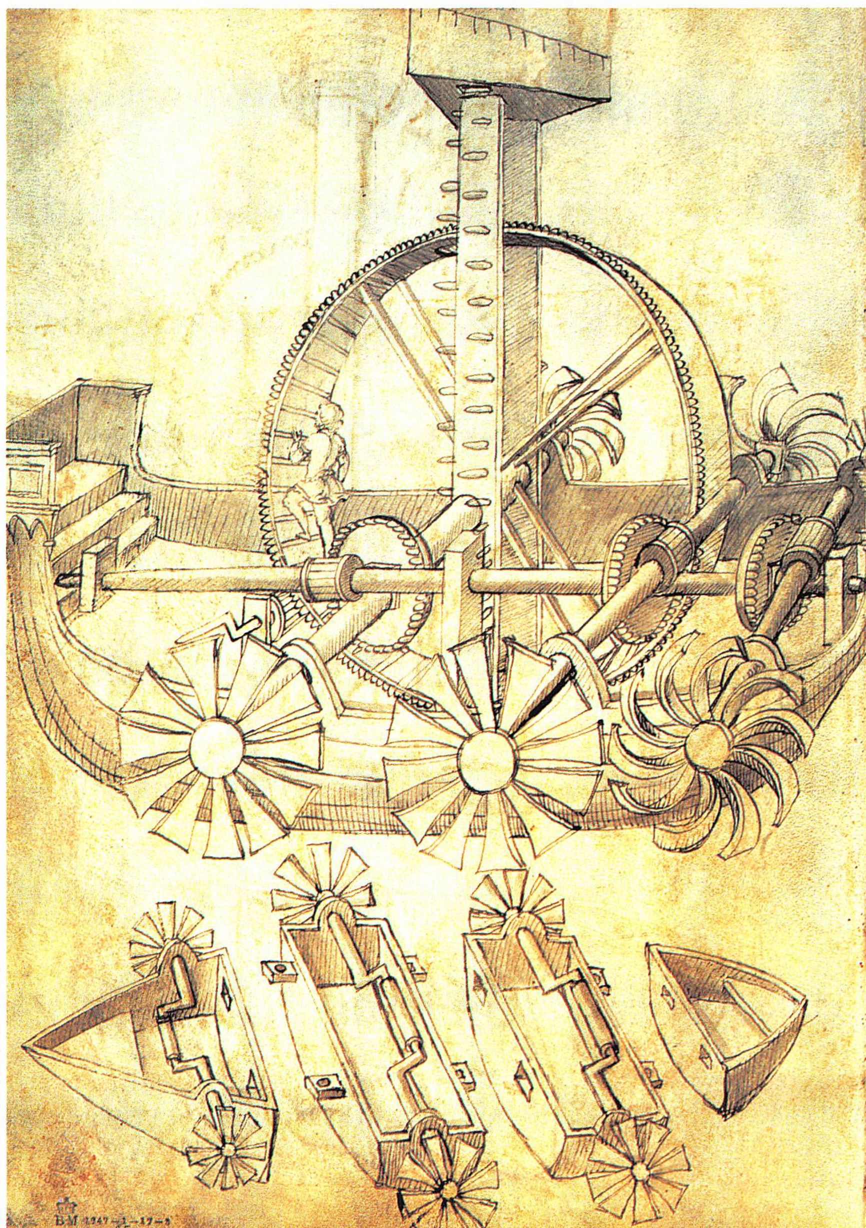
De fait, il incarne le nouveau visage de l'ingénieur de la Renaissance, désireux de renouveler le savoir technique de l'Antiquité. Pour déchiffrer et comprendre les textes anciens, notamment ceux de Vitruve (voir l'article de P.

Fleury, p 16), il les traduit visuellement en images. En reproduisant fidèlement le dispositif qu'il décrit, le dessin rend le texte intelligible. Et Taccola bouscule les traditions. Il expose la vaste gamme des thèmes auxquels il s'attelle, non pas dans des carnets secrets de *bottega,* mais dans de véritables traités techniques. Ses publications font ainsi de lui l'archétype d'un nouveau genre littéraire, l'innovateur qui ouvre la voie à ses plus grands et plus illustres héritiers : Francesco di Giorgio et Léonard de Vinci.

LE DIGNE HÉRITIER

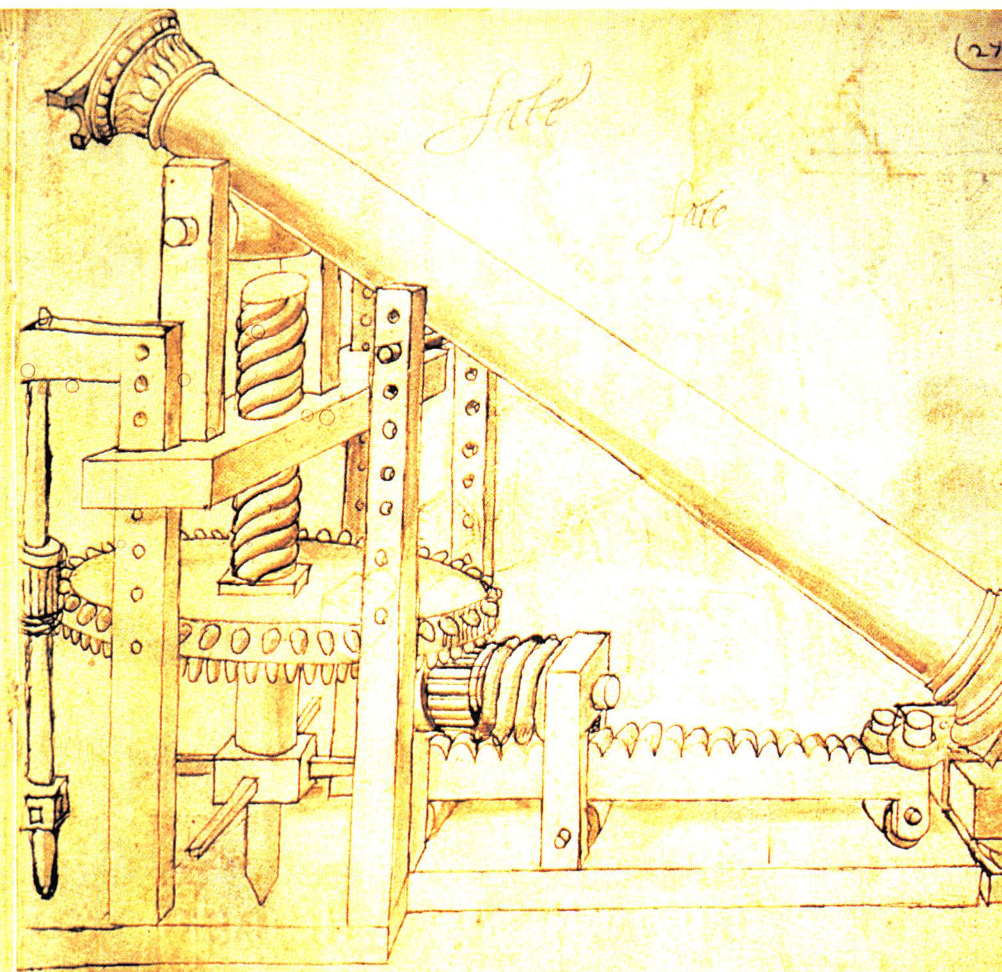
Francesco di Giorgio, élève de Taccola, se distingue néanmoins de son maître par une connaissance technique plus approfondie et plus mûre. Sa formation, semblable à celle des artistes ingénieurs précédemment cités, l'oriente d'abord vers la peinture et la sculpture, domaine où il excelle. Il devient ensuite architecte, ingénieur civil et militaire. Les principales cours italiennes font appel à ses talents d'ingénieur. Le Duc d'Urbino lui confie des travaux d'architecture civile et militaire. En 1490, on lui demande son avis pour la construction du tambour du Dôme de Milan, alors au centre de vives polémiques. A cette occasion, il rencontre Léonard de Vinci.

La formation pluridisciplinaire de Francesco di Giorgio découle du dialogue entre le monde artistique des *bottega* et celui, plus humaniste, des bibliothèques. Comme Taccola, F. di Giorgio attribue une fonction primordiale au dessin (voir l'article de G. Comet, p 51), moyen d'expression privilégié pour communiquer au monde ses propres inventions. Lui aussi se sent libéré des liens traditionnels du secret de la *bottega.* Comme Taccola, il veut atteindre le savoir des Anciens, réinterpréter les modèles des générations précédentes. S'inspirant largement des carnets de Taccola, comme le prouve son superbe *Codicetto*, il propose ses propres modèles et inventions. Et grâce aux nouvelles règles de la perspective, ses dessins supplantent tous ceux des autres.



Comme Taccola, Francesco di Giorgio attribue une fonction primordiale au dessin. Comme lui aussi, il s'intéresse aux moyens d'aller sur ou sous l'eau (ci-dessus son navire à pales).

Ses textes se distinguent par l'emploi de l'italien et non du latin. Cette langue lui permet d'être plus facilement compris des artistes ingénieurs italiens. A travers eux, il aspire à devenir le « bagage culturel » obligatoire des générations à venir. Car la relève est déjà assurée. Siennois et florentins, entre autres, vont continuer, avec une constante régularité, de transmettre les modèles de machines dessinés et décrits par F. di Giorgio. On les retrouve, en Italie et à l'étranger, avec peu de variantes, dans de nombreux carnets manuscrits et imprimés des XVIe et XVIIe siècles, et dans les traités techniques des XVIIIe et XIXe siècles.



MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES, FLORENCE

Pour déplacer colonnes et obélisques, F. di Giorgio imagine des appareils à engrenages complexes. Faisant forte impression, ces machines seront recopiées jusqu'au début du XVIIe siècle.

Dans ses traités, Francesco di Giorgio aborde principalement les thèmes liés à l'ingénierie militaire, à la réglementation et à l'exploitation des eaux, ou encore à la production d'énergie. En témoigne l'incroyable série de moulins à eau, à vent, et de marée, proposés et dessinés par l'ingénieur siennois. Il s'attelle ensuite à la mesure des distances et au problème du transport de lourdes charges, sur terre ou sur mer. Enfin, ses traités comportent de nombreux projets destinés à résoudre les grands problèmes de logistique qu'entraîne le déplacement des poids sur les chantiers de l'architecture.

Ces derniers projets ne s'adressent pas aux chantiers traditionnels, où la technique de construction stagne depuis des siècles : aucune innovation moderne n'est venue améliorer les instruments antiques comme la chèvre [3] ou la scie hydraulique. Ils concernent surtout les grands chantiers, mis en œuvre par les princes et les mécènes de la Renaissance, dans les principales villes du centre et du nord de l'Italie. Citons pour exemple la construction de la Basilique Saint Pierre de Rome, véritable chantier-spectacle. Leçon de technique et d'émulation intellectuelle, cette construction va demeurer ancrée dans la mémoire de générations d'architectes.

Pour ces gigantesques constructions, F. di Giorgio offre donc de fascinantes solutions de levage et de transport. Elles reposent, pour la plupart, sur des mécanismes élémentaires, combinant de multiples leviers et vis sans fin. On les retrouve dans les planches qui illustrent la mise en place de l'obélisque du Vatican [4]. Une opération très ambitieuse de la part des Papes humanistes, qui, en menant à terme son édification, ont égalé et dépassé les hauts faits des Anciens, au nom de la foi chrétienne.

Ultime consécration, cette entreprise deviendra le banc d'essai et l'exercice intellectuel par excellence de plusieurs générations d'architectes qui élaboreront, d'un point de vue purement théorique, d'infinies combinaisons de machines.

La tâche est ardue. Comment amener l'obélisque de Néron, initialement mis en place derrière la basilique, jusque sur la place Saint Pierre, et ce, sans l'endommager ? Après de nombreuses tentatives infructueuses, l'opération sera finalement confiée à Domenico Fontana.

Une seule solution s'offre à lui : transporter l'obélisque couché. Le chantier mis en œuvre est gigantesque. Fontana en confie la réalisation à une foule d'hommes et de chevaux qui synchronisent leurs efforts musculaires au rythme des trompettes et des cloches. Soixante-douze puissantes pinces de fer se combinent avec autant de treuils et de leviers. Quelque 11 kilomètres de câbles seront nécessaires pour tirer et hisser l'obélisque.

Les nombreux détracteurs de Fontana trouvent son chantier scandaleusement surdimensionné. Il est pourtant significatif du changement d'époque. La recherche philologique et intellectuelle du chantier de la Renaissance a déjà cédé la place au pragmatisme matériel du chantier baroque. ■

3 - Appareil de levage composé le plus souvent de trois poutres disposées en pyramide triangulaire dont le sommet soutient une poulie manœuvrée à l'aide d'un treuil.

4 - Ces planches datent de la fin du XVIe siècle.

L'AUBE DE LA CULTURE TECHNIQUE

Pour faire valoir leurs compétences auprès des princes qui les emploient, les ingénieurs de la renaissance italienne se mettent à rédiger des traités techniques dans lesquels, des machines de guerre à l'hydraulique, le dessin occupe une place de plus en plus importante. PAR GEORGES COMET


MUSÉE D'HIST. DES SCIENCES DE FLORENCE

Dans le *Texaurus,* qu'il dédie en 1348 à Philippe VI de Valois, Guido da Vigevano représente par des dessins explicites les machines et objets qu'il a imaginés. (Homme traversant une rivière sur un cheval équipé d'outres comme flotteurs.)

Jusqu'au XIVe siècle, c'est presque uniquement par la parole et le geste, que – charpentier ou sculpteur – l'ouvrier, c'est-à-dire celui qui « œuvre », transmet son savoir-faire. Objets encore rares, les livres traitent de sciences bien plus que de techniques. Ils rendent compte des phénomènes et de l'univers, expliquent le monde. Ils disent rarement comment s'y prendre pour le transformer.

A quelques exceptions près : quelques traités antiques, tels ceux de Vitruve (Ier s. av. J.-C.) ou de Héron d'Alexandrie (Ier s. ap. J.-C.) ou quelques œuvres médiévales : celle du moine Théophile au XIIe siècle (sur les couleurs, le verre, le métal) ; celle de l'architecte français Villard de Honnecourt, au XIIIe siècle, dont les carnets de chantier montrent les plus anciens dessins de scie hydraulique et de vérin connus.

Ces ouvrages, cependant, n'ont pas vocation didactique. Ils s'adressent à des initiés, leur apportant des compléments dans leur discipline, un peu à la façon de nos actuelles revues techniques professionnelles.

C'est à partir du XIVe siècle qu'une nouvelle littérature à visée technique se met à circuler en Europe. Elle a souvent pour auteurs des médecins au service de cours princières. C'est l'astrologie qui les a conduits jusqu'aux machines. En effet, aux XIIe et XIIIe siècles, cette matière revient au premier plan des spéculations intellectuelles et tient une grande place en médecine, dans le diagnostic comme en thérapie. Ainsi, tenus de dresser les horoscopes les plus précis possibles, de nombreux médecins se sont-ils initiés, *via* l'observation précise du ciel, à une certaine rigueur dans le raisonnement, à la manipulation d'instruments scientifiques (la lunette) et à la mesure méthodique du temps. Puis, de là, par une sorte d'extension de leur savoir-faire, ils sont passés à d'autres aspects de la précision mécanique : horloges, machines de théâtre ou de guerre, objets fort prisés des princes qui les emploient.

On doit donc à ces médecins-astro-

logues d'avoir fait sortir la réflexion technique du monde des clercs, qui était le seul à la pratiquer quelque peu, pour l'introduire dans le monde de la cour et de la ville.

Dès lors, le ton, l'intention, le contenu de ces nouveaux livres changent. Destinés à des lecteurs politiquement et économiquement influents, mais qui ne sont en rien spécialistes des techniques ou des sciences, ces ouvrages ont désormais pour vocation d'informer et convaincre. Informer sur les objectifs à atteindre, sur le projet poursuivi ; convaincre, en ne cachant rien du maniement et de la construction des machines.

Un bel exemple de ces ouvrages est le *Texaurus* de Guido da Vigevano. Italien d'origine, ce médecin du XIVe siècle sert d'abord l'empereur Henri VII, avant d'entrer à la cour de Philippe VI de Valois en tant que médecin de la reine. C'est d'ailleurs au souverain français qu'il dédie son livre rédigé en 1348. Feuilletons-le.

De la médecine à la navigation et aux machines de guerre, les disciplines abordées dans le *Texaurus* sont très diverses. L'auteur suggère de construire des bateaux démontables, envisage de propulser des navires par des roues à aubes actionnées à la manivelle, connaît et utilise le vilebrequin. Il imagine également le char d'assaut et dessine une voiture automobile mue par le vent... Objets et machines sont minutieusement décrits et le lecteur est bien guidé sans avoir besoin de connaissances scientifiques préalables. Les images, qui abondent dans l'ouvrage, sont destinées à rendre « manifeste » la description. Elles n'ont rien d'austère, ne sont pas d'arides croquis cotés, mais décrivent plaisamment l'emploi de l'engin avec, si besoin, des vues de détail.

Evidemment, nombre de ces machines n'ont pas été construites. Le fait se retrouve d'ailleurs chez tous les « ingénieurs » de ce temps. Leurs livres, au beau milieu de machines usuelles, en présentent d'autres qui sont des innovations plus ou moins efficaces, d'autres encore qui sont irréalistes dans les conditions générales de l'époque. Restent les intuitions. Vigevano, par exemple, préfigure en imagination la standardisation. Très préoccupé par la croisade qu'envisage Philippe VI, il songe en effet à construire des machines de guerre transportables en pièces détachées interchangeables, et dont le bois serait renforcé de fer aux endroits fragiles...

Un autre exemple de ce type d'ouvrages est celui que rédige Konrad Kyeser en 1405, l'année de la mort de Vigevano. C'est une véritable somme des sciences appliquées (*Bellifortis*) qui passe en revue machines de guerre, astrologie, machines hydrauliques. Comme Vigevano, Kyeser est un médecin-astrologue qui s'adresse à une cour princière : celle du Palatinat. Son livre, très illustré, rappelle les encyclopédies antiques ou byzantines et obtient un franc succès : on en connaît plus de vingt copies en deux générations. Pendant près d'un demi-siècle, entre les années 1380 et 1430, le monde germanique semble d'ailleurs être celui d'un renouveau de la pensée et de l'intérêt pour les techniques, avant que l'Italie ne prenne le relais. De ces débuts du XVe siècle, on ne citera guère dans la péninsule qu'un médecin : le Vénitien Giovanni Fontana, le premier de ces Italiens dont nous ayons conservé des carnets de dessins.

Autre fait à mentionner : la place que les mathématiques se mettent à occuper au XIVe siècle, car le calcul rapide est devenu indispensable aux marchands. Dans la Florence du XIVe siècle, qui n'atteint pas 100 000 habitants, 1 200 à 1 500 enfants apprennent l'arithmétique. Les ouvrages de mathématiques à l'usage des marchands se répandent. Ils sont écrits en langue vernaculaire et non plus en latin scientifique, signe que leurs lecteurs sont plus attentifs au savoir qu'à l'héritage antique. Les mathématiques entrent ainsi à part entière dans l'éducation et la culture du Quattrocento. Les peintres en sont imprégnés et un artiste comme Piero della Francesca (1416-1492) compose un traité d'arithmétique bien connu. C'est dans ce contexte et ce milieu que l'on rencontre ces fameux ingénieurs de la Renaissance dont le grand siècle est le XVe, mais un XVe siècle débordant largement sur le suivant.

Les hommes à citer sont nombreux. Certains, tel Antonio Francesco Averlino, dit Filarète (1400-1470), sont surtout architectes ; d'autres, davantage ingénieurs militaires comme Roberto Valturio (1413-1484). D'autres encore sont avant tout des bâtisseurs, inventeurs et concepteurs mais pas écrivains, comme Brunelleschi (1377-1446).

SIENNE AU QUATTROCENTO, UN HAUT LIEU DE LA TECHNIQUE

Les plus célèbres de ces artistes-ingénieurs sont Taccola et Francesco di Giorgio. Tous deux sont siennois, enfants de cette ville qui fut longtemps la rivale de Florence et qui, au XVe siècle, demeure un haut lieu du progrès technique en Italie. Entre autres raisons parce que Sienne, entre 1200 et 1400 environ, a construit un réseau d'aqueducs souterrains, les *bottini*, dont l'importance est vitale pour la ville et qui en a fait un lieu d'innovation technique considérable dans ce domaine. L'entretien de ce réseau incite en permanence les siennois à être à la pointe des travaux hydrauliques.

Un demi-siècle sépare nos deux hommes ; Taccola domine la première moitié du XVe siècle, Francesco di Giorgio la seconde.

Mariano di Jacopo, par la suite connu sous son surnom de Taccola (le corbeau), naît en 1381 dans un milieu très humble : il est fils de vigneron. Il semble avoir en vain tenté de se faire



Francesco di Giorgio s'est surtout intéressé à l'hydraulique. Ses traités innovent dans la présentation des machines : dans un souci de clarté, textes et dessins sont intimement liés. Ses commentaires sont émaillés de précisions mathématiques et de recommandations d'emploi.

admettre dans le corps des notaires. On le retrouve comme gestionnaire d'une œuvre pour les étudiants, puis à la tête, pendant vingt ans, du service des ponts et chaussées de Sienne. Il meurt à une date imprécise entre 1453 et 1458. Il est pratiquement le contemporain de son ami le Florentin Filippo Brunelleschi, le célèbre architecte de la coupole de Santa Maria del Fiore, de quatre ans son aîné et comme lui passionné d'hydraulique. Mais Brunelleschi est très soucieux du secret des procédés, de la protection de la propriété intellectuelle de l'inventeur et il reproche à Taccola de trop diffuser sa science.

A les regarder de près, les ouvrages qu'a laissés Taccola ne sont en fait pas aussi explicites qu'il pourrait paraître. Le texte, écrit dans la langue scientifique, le latin, demeure bien souvent laconique : « *Le dessin parle de lui-même* » peut-on souvent lire en légende. C'est que, adressé à l'empereur Sigismond de Luxembourg, son *De ingeniis* est accompagné d'une véritable lettre de candidature à un poste de maître du génie hydraulique. Dans ces conditions, s'il convient que texte et dessins informent sur ce que l'on peut réaliser, donnent à voir et intéressent, ils doivent aussi éviter de transmettre des secrets de fabrication. Un tel manuscrit, tout comme l'*opusculum* de Francesco di Giorgio, un demi-siècle plus tard, évoque donc un de nos luxueux dépliants modernes destinés à montrer ce que savent réaliser nos ingénieurs et leurs ateliers.

A la mort de Taccola, Francesco di Giorgio est un adolescent. Il est né en 1439 dans un milieu aisé. Son père, un fonctionnaire public siennois, a pu lui ouvrir quelques portes. Il étudie la peinture, la sculpture et suit la formation habituelle des artistes d'atelier en atelier, à Sienne, à Turin, à Rome aussi. Il travaille alors comme sculpteur, et aussi comme architecte. En 1469, à 30 ans, on le retrouve « maître d'œuvre du réseau des eaux » de la ville de Sienne. A partir de 1477, il travaille à Urbino, pour son duc, un condottiere avisé, Frédéric de Montefeltre, ce qui atteste que sa réputation a largement dépassé les murs de sa cité d'origine.

On voit bien chez lui comment se sont enchaînés les divers domaines de son activité. Le sculpteur du départ devient très vite un fondeur avec la vogue des statues de bronze. Le bronze – métal dont sont fabriqués les canons – le conduit à l'artillerie, et les fortifications à l'architecture, militaire puis civile. Le génie de Francesco est polymorphe : peintre, sculpteur, architecte, mécanicien. Son œuvre picturale le place aux premiers rangs des peintres du Quattrocento. On a réhabilité en lui l'architecte, un temps estompé ; le grand mécanicien, en revanche, est longtemps resté négligé, écrasé dans la postérité du XXe siècle par l'image de Léonard de Vinci qui lui a d'ailleurs beaucoup emprunté.

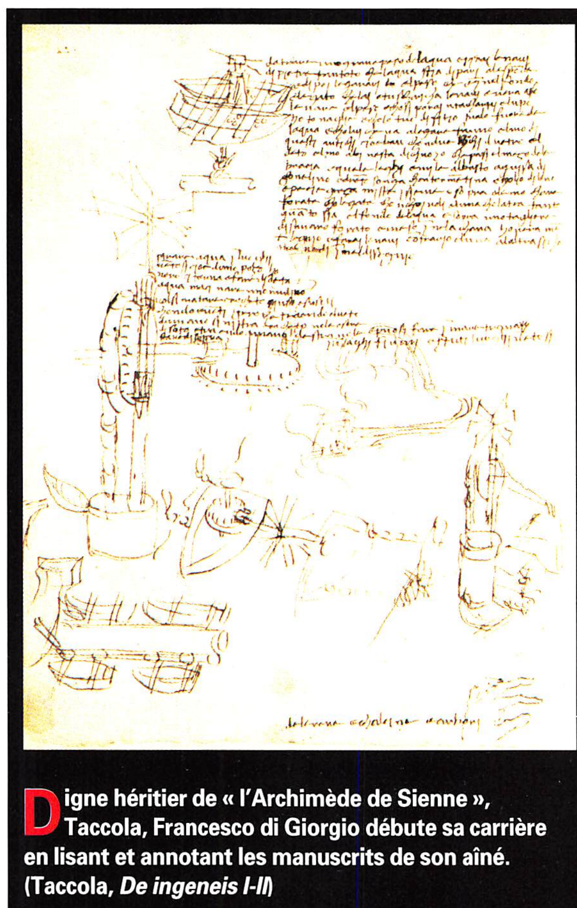
Les intentions premières de Taccola et Francesco di Giorgio sont d'abord de restituer le savoir technique de l'Antiquité en le mettant à la portée des lecteurs de leur temps. C'est ainsi que Taccola présente des images qui permettent de visualiser les machines antiques. Il a manifestement peu innové, mais il est un maillon essentiel dans la transmission des connaissances. Bien souvent il est le premier, en ce début du XVe siècle, à donner une bonne représentation graphique de machines issues d'une longue tradition médiévale et antique. Il devient alors pour l'historien une source de première importance.

Francesco di Giorgio, en revanche, tout en étant animé du même souci, représente un tournant dans la culture humaniste. Il associe au savoir technique classique les exigences opérationnelles de l'artisan. Aussi innove-t-il sur le plan de l'exposition. Il présente

des commentaires sur les matériaux nécessaires, les dimensions des engins, les moyens de la construction, les recommandations d'emploi. On trouve même parfois des précisions mathématiques sur les dimensions des roues et l'agencement des engrenages. Il veut, d'autre part, *« faire concorder l'écriture et le dessin »*. Pour y parvenir, il trace ses figures selon une perspective clairement intelligible, insère ses machines dans un cadre qui circonscrit le champ de l'observation, ce qui permet de donner des vues à différentes échelles et de faire apparaître des détails suffisamment précis pour guider la construction. Il intègre intimement l'image au texte dans une mise en page nouvelle qui place commentaire et croquis côte à côte. Du point de vue du dessin, Francesco a une nette supériorité sur ses contemporains, il en est conscient et légitimement fier.

L'un comme l'autre, nous l'avons dit, veulent retrouver et reproduire le savoir technique des Anciens. Taccola, qui se qualifie lui-même d'Archimède de Sienne, se situe volontiers dans la lignée de l'ingénieur syracusain, devenu alors un véritable mythe. Il est un « inventeur » dans le sens où il apporte quelques éléments nouveaux, mais aussi dans le sens médiéval du terme : celui qui retrouve quelque chose d'ancien, comme on parlait de l'Invention de la Vraie Croix.

Les informations fournies par Taccola sur les techniques militaires montrent bien qu'il n'est pas vraiment un ingénieur militaire. C'est sur la demande du milieu qu'il propose machines de guerre et défenses pour lutter contre les Turcs ; mais lorsqu'il les dessine, il s'appuie essentiellement sur les textes des auteurs romains Frontin (Ier s.) et Végèce (IV-Ve s.), lesquels, sans être totalement dépassés, ne sont plus à jour des réalités de son époque. Il innove en montrant des machines de chantier inspirées de celles que Brunelleschi a mises au point pour l'édification de la coupole de Florence. Toutefois, ne les ayant pas vues fonctionner, il les dessine d'après ce qu'on lui en a dit. Il en est de même pour un navire destiné aux transports lourds que lui a suggéré le tristement fameux navire de Brunelleschi qui ne fit qu'un seul voyage. Il est en revanche plus original dans l'hydraulique : il y montre diverses méthodes pour construire et installer de solides structures dans l'eau, mer ou fleuves. Il propose des moulins à marée dont on ne sait, à vrai dire, s'ils se rapportent à des informations sur l'Europe du Nord ou aux réalités de la lagune vénitienne. Le paysage dans lequel ils sont présentés évoque quoi qu'il en soit la Toscane maritime. Le tout est dans la lignée de la grande culture technique siennoise.



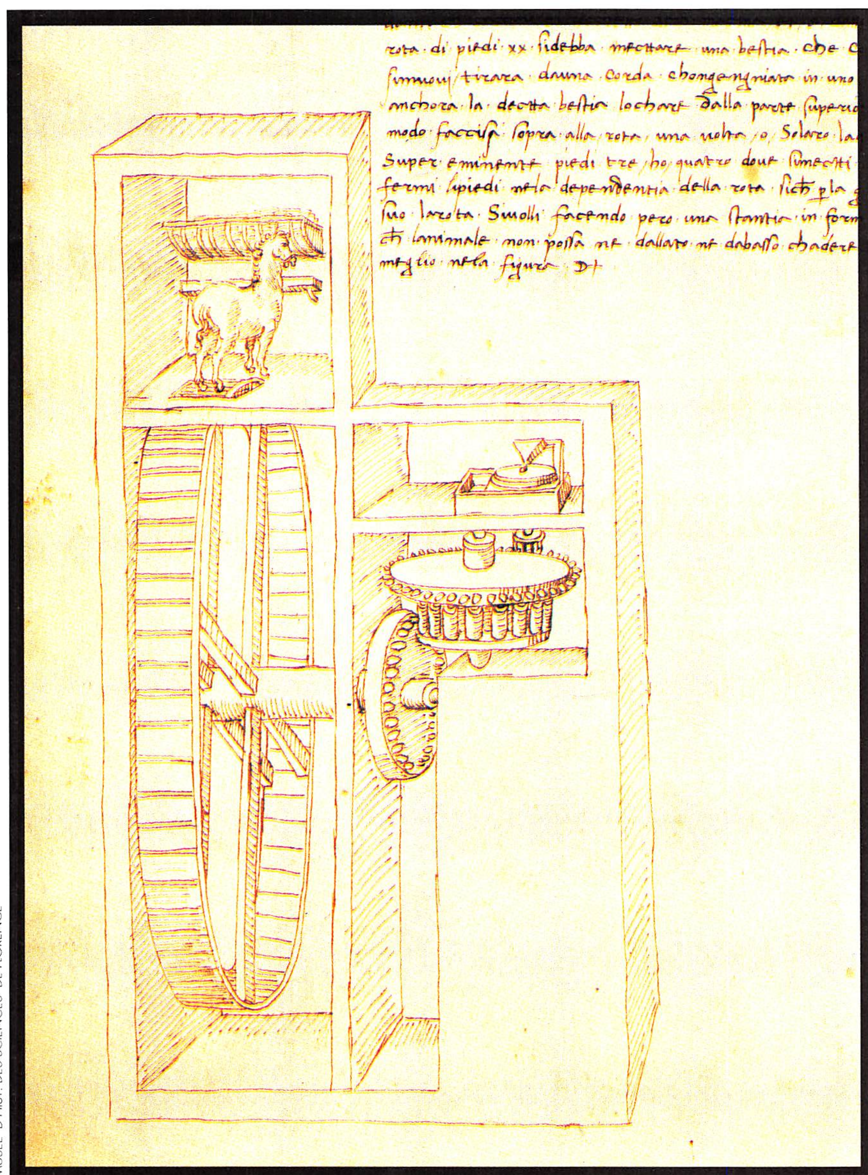
MUSÉE D'HIST. DES SCIENCES DE FLORENCE

Digne héritier de « l'Archimède de Sienne », Taccola, Francesco di Giorgio débute sa carrière en lisant et annotant les manuscrits de son aîné. (Taccola, *De ingeneis I-II*)

La carrière de Francesco di Giorgio a commencé par une lecture attentive des livres de Taccola dont il annote les manuscrits en détail. Di Giorgio apparaît ainsi, en esprit sinon en réalité, comme un élève de Taccola même s'il ne cite jamais celui dont il s'inspire. Cette pratique est alors courante : quand les sources ne sont pas antiques on ne les mentionne pas. Pendant longtemps, di Giorgio a développé les thèmes de Taccola, jusqu'à ce que ses papiers révèlent un brusque changement, après qu'il se soit installé à Urbino. La place de Taccola se restreint en effet, tandis que celle qui lui est propre gagne du terrain. Il insiste sur certaines innovations comme la vis sans fin, les crémaillères métalliques ou des engrenages à la complexité croissante. Francesco, après avoir ainsi récupéré le corpus technique de Taccola, l'a enrichi et mis à jour, avant d'y insérer sa propre novation : des dispositifs bien plus complexes.

Francesco a eu le désir d'écrire un traité à la façon de Vitruve et s'est inspiré de l'auteur romain pour l'organiser. Signe des temps, il l'a écrit en italien. De son traité, le point plus important est probablement qu'il est à l'origine d'un processus qu'a poursuivi Léonard. Il commence à faire passer les connaissances techniques de l'étape du technicien à celle de l'ingénieur. C'est di Giorgio qui, le premier, a cherché à organiser de façon systématique la présentation des machines et des dispositifs mécaniques. Au lieu de n'exposer qu'une simple suite de cas, il a tenté d'élaborer un discours logique. D'une série quasiment infinie d'exemples particuliers, on passe à un

Dans ses études sur les engins militaires (chars d'assaut, abris mobiles...), Taccola s'inspire encore fortement des textes anciens et de ceux du Moyen Age.



MUSÉE D'HIST. DES SCIENCES DE FLORENCE

Les machines du Quattrocento sont limitées par deux facteurs : le nombre de dispositifs mécaniques disponibles et les sources d'énergie. Tout l'art est de trouver de nouvelles combinaisons. (Moulin à grain de di Giorgio).

nombre limité de types : cette invention d'un discours hiérarchisé sur la technique est celle, à proprement parler, de la technologie.

Cette dernière est encore très humaine car c'est bien chez le concepteur qu'en demeure le fondement. Giorgio l'annonce clairement : « *Attention !*, écrit-il, *tout ce que contient cet ouvrage ne peut être parfaitement montré par des figures. Bon nombre de ces choses résident en effet dans la tête et le talent de l'architecte et ne peuvent être montrées par la peinture et le dessin* ». Disant cela, il ne fait que reprendre ce que Taccola avait déjà énoncé : « *L'art de l'ingénieur réside davantage dans la tête et l'intelligence de l'architecte que dans le dessin et l'écrit* ».

Cette tradition inaugurée par Taccola et Francesco s'est poursuivie au XVIe avec les Peruzzi, Cataneo, Vannoccio Biringucci, etc. Longtemps on a répété leurs dispositifs sans même savoir qu'on les leur devait.

Le contenu de ces divers traités permet de dresser un tableau des connaissances mécaniques du temps ainsi que des moyens d'action sur la matière. La fonction sociale des ingénieurs est d'être au service d'un prince mécène dont ils attendent la fortune et dont ils espèrent la gloire. Aux princes, il fallait parler d'abord de leur premier intérêt : la guerre. Mais on leur parle aussi de tout ce qui peut accroître leur prestige, voire de certains moyens d'aménager le territoire : adductions d'eau, canaux. Car les puissants ont également le souci du bon gouvernement, comme le montre la fresque du *Buon governo* à Sienne, dès le milieu du XIVe siècle.

Il en résulte que toute une partie des traités parle de la guerre. On y trouve bien sûr les canons, mais aussi de nombreuses machines de jet, mangonneaux et trébuchets, destinées à envoyer chez l'ennemi des projectiles divers dont le feu. On rencontre différentes variétés d'échelles pour franchir les murailles, des moyens de sape, des engins de siège, des méthodes pour détourner les rivières et inonder les terres ennemies, des moulins pour assurer la nourriture des troupes en campagne.

Dans le domaine civil, les déplacements importent davantage que la balistique : déplacements en hauteur ou latéraux, engins de levage et de transport terrestre ou fluvial. Les mêmes procédés sont utilisés en version militaire ou civile : les moyens d'escalade permettent d'élever des échafaudages, le travail de sape sert dans les mines, les connaissances qui permettent d'inonder servent à irriguer, à pomper l'eau, ou à établir des adductions d'eau.

Seules quatre sources d'énergie sont alors utilisées : l'homme, l'animal, l'eau, le vent. L'homme fournit l'énergie en marchant dans une roue ou sur elle, sur un plateau tournant, en tournant une manivelle ou en actionnant un système de bielle-manivelle. L'animal fait tourner un manège même si Francesco propose curieusement de faire tourner une grande roue par les pattes arrière d'un cheval. L'hydraulique c'est avant tout le moulin à roue verticale et celui à roue horizontale, la roue horizontale étant plus fréquente sur les rives de la Méditerranée. Mais nos auteurs connaissent le moulin à marée, apparu en Vendée au XIe ou XIIe siècle. Enfin, depuis la fin du XIIe siècle en Occident, on sait également utiliser le vent.

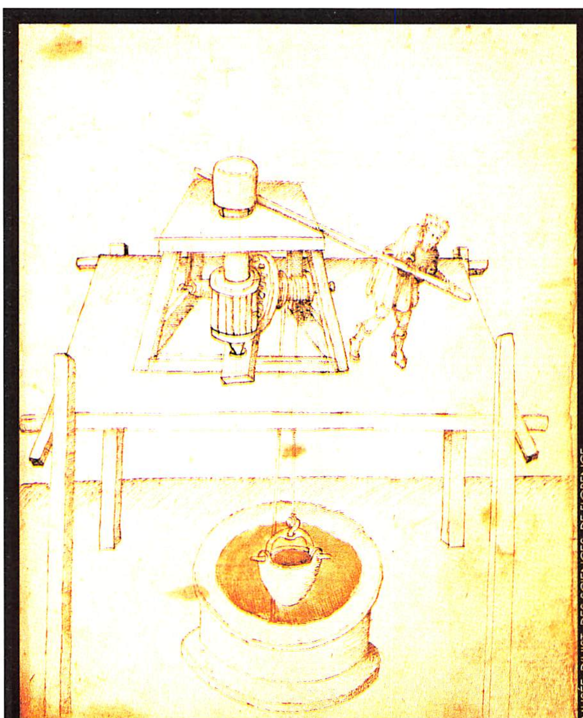
Quelques procédés mécaniques nouveaux sont apparus aux XIVe et XVe

siècles et les ingénieurs les emploient, parfois de manière inconsidérée comme le font des néophytes. Ainsi Francesco utilise-t-il souvent la vis sans fin et la crémaillère métallique. Il en est de même pour le système de la bielle-manivelle. Avant le XVe siècle on ne connaissait en Europe que l'arbre à came pour transformer le mouvement rotatif en alternatif. La bielle-manivelle apparaît à la fin du XIVe siècle et Taccola comme Francesco l'utilisent abondamment. Ainsi Taccola fait-il actionner un moulin à bras par un homme manipulant une longue bielle qui fait tourner une manivelle entraînant la meule courante. L'auteur déclare d'ailleurs à ce sujet : « *Le travail est pénible pour celui qui tourne. Il moud peu et on l'appelle communément moulin à manche de papillon* ».

DES QUESTIONS LAISSÉES SANS RÉPONSE

Enfin, les auteurs du XVe siècle et leurs successeurs laissent entrevoir les grands problèmes mécaniques qu'ils ont rencontrés même s'ils ne sont pas encore clairement explicités. Ces problèmes sont de deux ordres : on cherche une technique performante pour pomper l'eau ; on est en quête d'une puissance accrue.

Aux XVe et XVIe siècles, l'extraction minière connaît un nouvel et grand essor. On estime que, de 1450 à 1550, l'extraction d'argent en Europe a été multipliée par cinq. La croissance est du même ordre pour tous les métaux non ferreux. Or, l'eau, toujours présente dans les mines, devient le problème principal de toute exploitation. L'expansion de l'activité minière, et donc de la métallurgie, s'en est trouvée limitée jusqu'à ce qu'on ait mis au point la pompe à feu réalisée au départ pour l'exhaure de l'eau des mines. Malgré les anciennes intuitions de Héron d'Alexandrie, il existait alors une barrière conceptuelle pour envisager de domestiquer la vapeur. Longtemps, en effet, les machines mécaniques n'ont été conçues que comme des pièges à mouvement. Un mouvement existait : l'homme, l'animal marchent, l'eau coule, le vent souffle. En domestiquant ce déplacement naturel, on lui fait tourner une roue ou lever un maillet. Le feu, lui, ne bouge pas et pour passer de la cuisson à la rotation il faut d'abord imaginer que l'on puisse créer du mouvement à partir de l'inanimé.



MUSÉE D'HIST. DES SCIENCES DE FLORENCE

Parmi les dispositifs mécaniques élémentaires, les engrenages en bois occupent une place de choix, s'agissant par exemple de convertir un mouvement rotatif dans un plan, en un mouvement rotatif dans l'autre. (Un treuil conçu par Taccola).

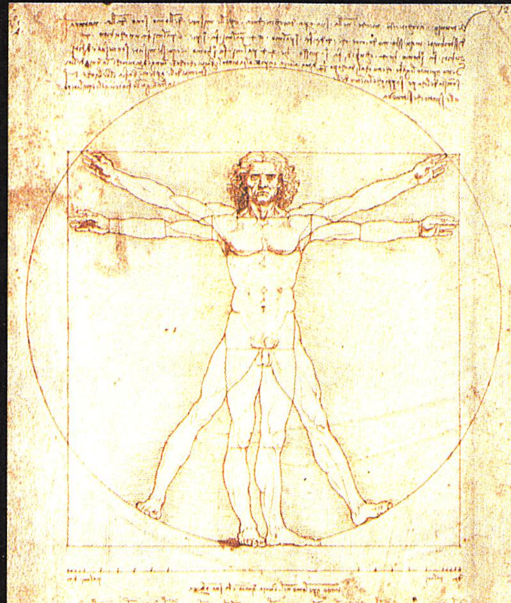
L'autre grande question est celle de la puissance des machines : elle demeure insuffisante. On a désespérément cherché à l'accroître en combinant les divers procédés d'une façon qui nous fait parfois sourire et relativise la valeur documentaire de ces projets. On pense par exemple à ces combinaisons, irréalistes en termes de rendement, d'animaux faisant tourner un manège pour pomper de l'eau qui, en retombant, fera tourner un moulin. Mais elles dénotent une double recherche : d'une part celle du mouvement perpétuel qu'il suffirait d'amorcer pour qu'il continue sur sa propre lancée, d'autre part la recherche d'une puissance supérieure par la multiplication et la combinaison des agents, un peu comme on ajoute des chevaux à un manège.

Au tournant des XVe et XVIe siècles, la technique est ainsi sortie du monde limité des artisans, chefs de chantiers ou hommes de cabinet. Elle est devenue une connaissance diffusée à des non-spécialistes, mais aussi un objet de débat, un sujet de réflexion dans les cours princières.

Au-delà d'un phénomène de mode, il s'agit bien d'une importante mutation intellectuelle. La réflexion sur les machines, leur fonctionnement, leur emploi, leur utilité n'est plus un domaine de l'esprit séparé du reste du monde et par là subalterne, abandonné à ceux qui ne pourraient accéder aux grands débats culturels. La technique est entrée dans le domaine de la pensée et de l'art, de la culture dirions-nous aujourd'hui.

La machine et, à travers elle, l'aménagement du monde par les hommes est devenue un terrain de rencontre. Savants, artistes, gouvernants s'y retrouvent, échangent, proposent. C'est un véritable carrefour du politique, du scientifique, de l'artistique et même de l'éthique qu'ont ainsi dégagé les ingénieurs de la Renaissance. ■

LÉONARD



« *Réfléchir est un acte noble, et réaliser, un acte servile* ». **Par cette phrase, l'enfant de Vinci cherchait-t-il à justifier l'inachèvement d'une grande part de ses œuvres ? S'il est une constante dans la vie de Léonard, c'est en tout cas celle-ci. Mais il en est une autre : cette conviction que le dessin, seul, permet d'exprimer son intelligence du monde. Et de fait, ses croquis d'engins et de mécanismes, accompagnés de commentaires précis, inventent le dessin technique.**

LA VIE DE LÉONARD D'ORIGINE, PASSION

Fils illégitime du notaire d'un village toscan, Vinci, Léonard ne poursuit pas d'études académiques. Vers l'âge de seize ans, il est admis dans l'atelier du célèbre Andrea Verrocchio, à Florence. C'est l'un des meilleurs d'Italie. Il y mène une vie studieuse et mouvementée. Puis il prend son envol : Milan, Florence encore, Rome, puis Amboise où, chéri par François Ier, il s'éteint en 1519.

PAR DOMINIQUE CHOUCHAN

« L'ŒIL, *appelé fenêtre de l'âme, est la principale voie par où notre intellect peut apprécier pleinement et magnifiquement l'œuvre infinie de la nature* ». Cette seule réflexion éclaire la pensée de Léonard de Vinci dans sa quête incessante de la vérité et sa recherche des lois de la nature. L'importance qu'il accorde à l'observation, pour comprendre le monde, imprègne l'ensemble de son œuvre. Pour cet homme universel, « *toutes nos connaissances découlent de ce qu'on ressent* », mais la vue est le plus noble des sens. A cet égard, il s'inscrit parfaitement dans la mouvance culturelle de son époque, marquée par une véritable mutation du regard sur les choses et sur la nature.

A la naissance de Léonard, en avril 1452, cela fait déjà une trentaine d'années que Filippo Brunelleschi a inventé la perspective. Peu de temps après, Leon Battista Alberti en a formulé les premières bases théoriques (voir l'article de V. Pialot, page 19). Léonard, pour qui le dessin constituera un outil d'investigation majeur, n'ignore évidemment pas les travaux de ces deux hommes. Leur génie a ébloui ses contemporains. Mais au-delà de la simple représentation du réel, c'est dans une véritable démarche de conceptualisation qu'il va se singulariser. « *Inventer* », dira-t-il, « *c'est reproduire* ». Or, reproduire suppose de saisir les lois générales qui sous-tendent les mécanismes observés, qu'il s'agisse du mouvement de l'eau, de l'air, ou du fonctionnement du corps humain.


ROGER VIOLLET

C'est dans la maison de son grand-père paternel, à Vinci, que Léonard aurait vécu jusqu'à l'âge de 5 ans.

: QUESTION
S DE SAVOIR

Il aura fallu soixante ans pour qu'il entreprenne son autoportrait : une sanguine désormais célèbre…

Pour comprendre l'œuvre de Léonard, nous disposons d'environ six mille de ses feuillets manuscrits. Tous les domaines du savoir y sont abordés (mécanique, géologie, anatomie, mathématiques, hydraulique, vision, perspective, etc.). On y découvre également ses idées sur l'art et ses pensées à caractère philosophique. Pourtant, Léonard se revendique comme un *« homme sans lettres »* et un *« disciple de l'expérience »*. Dans la première partie de sa vie au moins, il semble plus intéressé par l'observation de la nature et les connaissances qu'il glane chez ses contemporains que par la lecture des auteurs de l'Antiquité. Ces derniers sont pourtant très en vogue dans la Florence des Médicis. Mais il affiche un certain dédain pour l'érudition et quelque mépris pour les philosophes et autres professionnels de la rhétorique, pour *« les récitateurs et les trompetteurs des œuvres d'autrui »*.

Sur ce point, note André Loechel, historien de l'art de la Renaissance, *« il s'oppose totalement à Michel-Ange et à sa passion de la lecture. Cela n'est peut-être pas sans rapport avec leur aversion l'un pour l'autre »*. Léonard se procurera malgré tout un certain nombre de livres. Il se félicitera même, dans l'un de ses écrits, d'en posséder deux cent dix-huit. En complet autodidacte, il se plongera dans la lecture d'œuvres anciennes – comme le *De Architectura,* de Vitruve (voir l'article de P. Fleury, p.16), très étudié à la Renaissance italienne. Il s'intéressera aussi à des traités récents ou contemporains – notamment ceux de Roberto Valturio, d'Alberti, ou du Siennois Francesco di Giorgio.

De fait, son statut de bâtard l'a d'emblée écarté des études acadé-

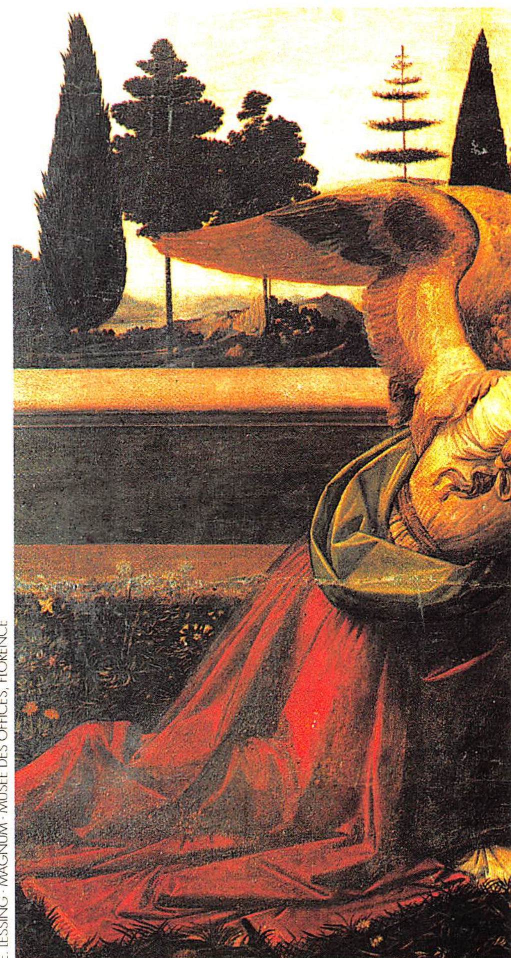

LE CLOS LUCE

miques. Léonard est le fils illégitime d'un notaire, Piero da Vinci, et d'une jeune femme, Caterina, dont on ignore jusqu'au nom patronymique. Il est né en plein milieu du Quattrocento, à Vinci, non loin de Florence. On sait très peu de choses de sa petite enfance, avant son inscription, en 1457, dans une déclaration fiscale de son grand-père, Antonio da Vinci (le père de Piero). Cette déclaration témoigne de sa présence, à l'âge de cinq ans, dans la famille paternelle. Les années qui précèdent ont été source de nombreuses spéculations.

Est-il resté chez sa mère, ou bien son père, qui s'est marié entre-temps, l'a-t-il pris à sa charge quelques mois après sa naissance ? Cette zone d'ombre alimentera notamment la réflexion de Sigmund Freud, qui lui voue une grande admiration. Le fondateur de la psychanalyse tentera en effet d'interpréter le seul « souvenir d'enfance » que Léonard ait consigné dans ses carnets, afin d'élucider certains traits de sa personnalité : en particulier son homosexualité (ou plutôt son apparente inactivité sexuelle) et son besoin insatiable de dévoiler les secrets de la nature (1).

Assez jeune, sans doute vers l'âge de seize ou dix-sept ans, il entre en apprentissage chez l'orfèvre, peintre et sculpteur Andrea Verrocchio.

1 – Sigmund Freud, *Un souvenir d'enfance de Léonard de Vinci*, Gallimard, 1991.



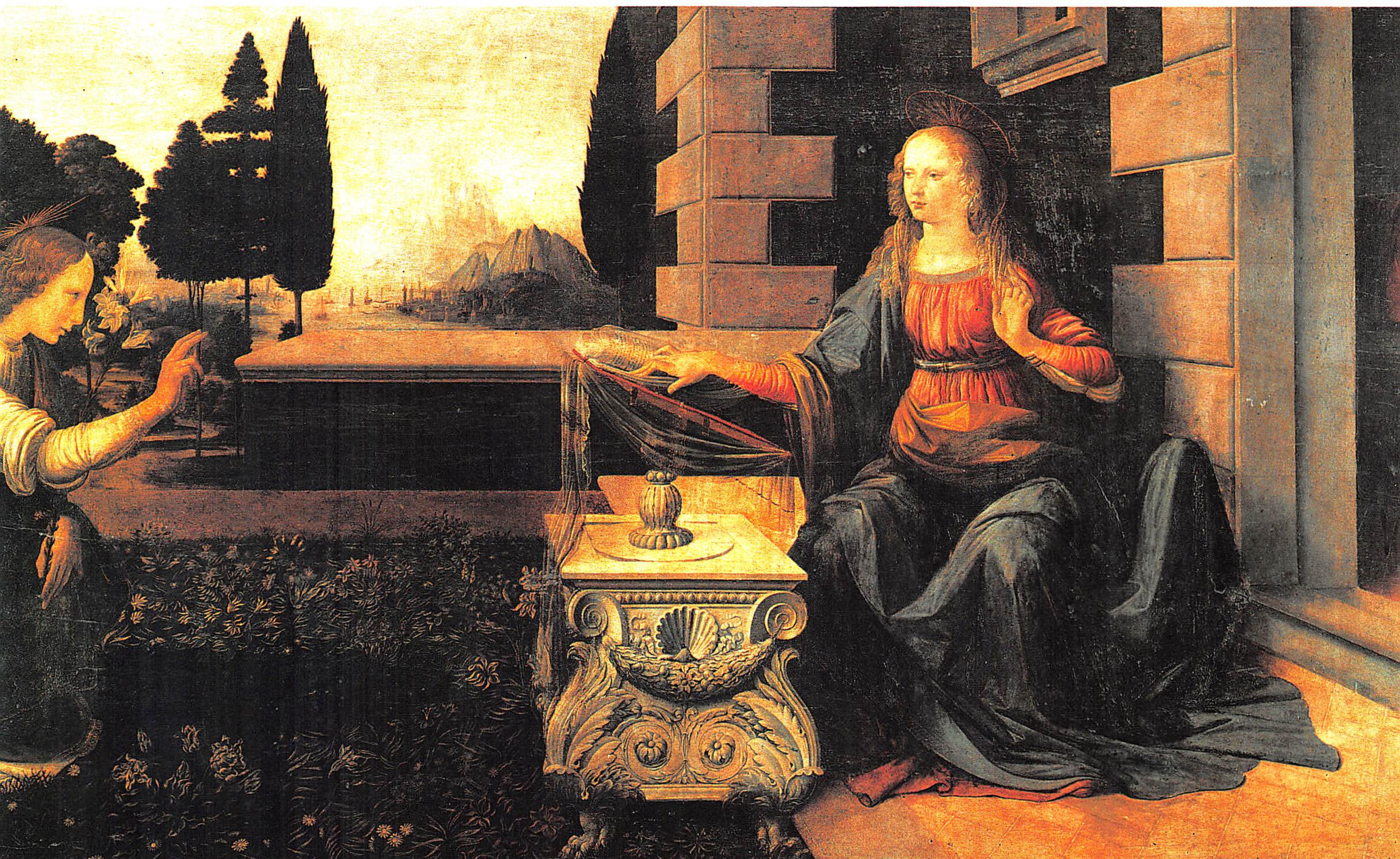
E. LESSING - MAGNUM - MUSÉE DES OFFICES, FLORENCE



G. DAGLI ORTI - MUSÉE DES OFFICES, FLORENCE

L'atelier de Verrocchio est alors le plus important de Florence, avec celui des frères Pollaiuolo. Le fils de Piero y acquiert les bases de la sculpture, de la peinture, de l'architecture, de la musique… Il est amené à fréquenter les fastes de la vie florentine : les Médicis mènent grand train, et son maître est vraisemblablement sollicité pour l'organisation de spectacles. Comme dans d'autres ateliers, on y reconstruit le monde, on parle antiquités, philosophie, musique. On y échange des idées, des projets, des recettes de vernis… C'est également là que sont formés nombre de

Dès 20 ans, Léonard est inscrit dans le registre des peintres florentins. Il participe, avec son maître Verrochio, à l'exécution du *Baptême du Christ*.



peintres devenus célèbres – tels Le Perugin ou Botticelli.

A vingt ans, Léonard a achevé son apprentissage. Mais il prolonge son séjour chez Verrocchio, et s'emploie à se perfectionner. Il ne s'en éloigne que cinq ans plus tard, pour devenir son propre maître. Dès lors, sa personnalité et son œuvre semblent échapper à toute forme de classification. Paul Valéry tombera lui aussi sous le charme : « *Il est fait pour désespérer l'homme moderne, qui est détourné dès l'adolescence dans une spécialité où l'on croit qu'il doit devenir supérieur parce qu'il y est enfermé* » (2).

François Ier, pour sa part, admirera en lui le « *grand philosophe* ». Mais c'est par ses compétences militaires qu'il décidera de se « vendre » au duc de Milan, lorsqu'il quittera Florence. Est-il alors ingénieur militaire ? Certes il imaginera toutes sortes d'armes offensives et défensives. Mais il exprimera son horreur de la guerre, qu'il qualifie de « *folie bestiale* ». Est-il inventeur ? Ses carnets sont remplis de dessins de machines, mais il n'en réalisera guère. Est-il théoricien ? Il ne réussira à finaliser aucun de ses traités. Est-il peintre ? Il passera une grande partie de sa vie à faire tout autre chose, et on lui connaît moins d'une quinzaine de tableaux (il en aurait réalisé, ou commencé, une trentaine).

Comme ces oiseaux dont il observe avec fascination le vol et qu'il libère dès qu'il les voit en cage (mais qu'il ne peindra pour ainsi dire pas), Léonard résiste à toute forme d'enfermement dans une image figée. A cet égard, l'une de ses premières inventions a valeur d'œuvre prémonitoire : il dessine un dispositif pour ouvrir une prison de l'intérieur (3). Ce projet, il est vrai, est conçu quelque temps après l'accusation de sodomie et la garde à vue dont il a fait l'objet, à l'âge de vingt-quatre ans.

Face au véritable puzzle qu'il a

Lors de son premier séjour à Florence, entre 1469 et 1482, il peint l'*Annonciation*, un tableau encore empreint du style de son maître.

2 – Paul Valéry, *Introduction à la méthode de Léonard de Vinci*, Gallimard (Folio essais), 1992.

3 – Serge Bramly, *Léonard de Vinci*, Lattes, 1995 (2e édition).



E. LESSING · MAGNUM · MUSÉE DES OFFICES, FLORENCE

Quittant Florence pour Milan, Léonard laisse son *Adoration des Rois Mages* inachevée. Nombre de ses peintures et traités connaîtront le même sort.

légué à la postérité, on peut malgré tout suivre un fil, celui de la permanence de ses préoccupations et de ses ambitions. Celles-ci s'affirment avec le temps. Comprendre comment les choses fonctionnent, telle va devenir l'une des obsessions de cet homme, à la fois solitaire et introduit dans les milieux mondains de son époque. Cependant, le peintre, ce « *maître de tout individu et de toute chose* », reste toujours présent derrière le technicien ou l'ingénieur : « *Il donne à voir par la peinture le résultat de ses observations du réel* », souligne A. Loechel, « *mais il se sent peintre avant tout* ».

Selon le récit de Giorgio Vasari (4), il aurait même, au terme de sa vie, exprimé à François Ier son regret « *d'avoir offensé Dieu et les hommes en ne travaillant pas dans son art comme il eût dû* ». D'après ce biographe, grand admirateur de Léonard : « *Il n'exerça pas une seule profession, mais toutes celles où entrait le dessin. Et avec son intelligence si divine et si stupéfiante, il ne s'adonna pas seulement à la sculpture [...] mais aussi à l'architecture [...] et, tout jeune, il parla le premier de canaliser l'Arno de Pise à Florence. Il dessina des moulins, des foulons et des machines qui pouvaient être mues par la force de l'eau, mais il voulut que sa profession fût la peinture* ».

Dès son arrivée chez Verrocchio, le jeune Léonard est fortement impressionné par l'œuvre de Brunelleschi (voir l'article de D. Lamberini, p. 44).

4 – Auteur d'un livre majeur sur l'histoire de l'art (publié en 1550, réédité en 1568), intitulé *Les vies des meilleurs peintres, sculpteurs et architectes*, et contenant notamment *Une vie de Léonard de Vinci, peintre et sculpteur florentin.*

Etant parvenu à s'imposer à la cour lombarde, Léonard y exerce ses talents d'artiste-ingénieur. Prenant pour modèle une jeune femme de la cour, il peint *La belle Ferronière*.


E. LESSING · MAGNUM · MUSÉE DU LOUVRE, PARIS.

Celui-ci avait notamment conçu et dirigé la construction de la coupole en briques de la cathédrale de Florence, Santa Maria del Fiore. Or, l'atelier du maître est sollicité pour achever l'ouvrage. Il s'agit de souder, puis de hisser à cent sept mètres d'altitude, la sphère de cuivre doré destinée à surmonter le dôme. Fasciné par cette réalisation exceptionnelle, Léonard dessine sur ses carnets les machines de levage utilisées pour l'occasion.

RAPIDEMENT, IL EXCELLE également dans la peinture et, aux dires de Vasari, dépasse vite le maître. Son premier fragment connu est l'un des anges du *Baptême du Christ*, un tableau commandé par des moines à Verrocchio, vers 1472. Puis il peint son *Saint-Jérôme* et l'*Adoration des Rois mages*, un retable destiné à un couvent des environs de Florence. Aucun de ces deux tableaux ne sera toutefois achevé. Pendant sa période florentine, il commence en outre à s'intéresser à l'hydraulique : il dessine des pompes à eau et toutes sortes d'instruments d'eau. Il se passionne pour l'étude des systèmes mécaniques.

Léonard se lance enfin dans les techniques militaires. Les conflits sont en effet incessants entre Florence, Milan, Rome, Venise, et Naples. En 1482, c'est d'ailleurs à la cour de Milan qu'il décide d'offrir ses services. Est-ce la fuite d'un environnement par rapport auquel il se sent


F. SCIANNA · MAGNUM

A Florence, Léonard aura séjourné à deux reprises : d'abord sous le règne des Médicis, puis dans l'éphémère république florentine.



finalement décalé, et peut-être insuffisamment reconnu ? Toujours est-il qu'il va désormais exercer ses talents d'« artiste-ingénieur » dans cette ville où règne Ludovic Sforza, dit le More.

Il part muni de sa lyre – le duc de Milan a une prédilection pour la musique – et d'une longue lettre en dix points destinée au chef milanais. Neuf d'entre eux vantent ses compétences et savoir-faire en matière de techniques militaires, offensives et défensives. Le dixième point évoque ses possibilités « en temps de paix » dans le domaine de l'architecture, de la peinture, de l'hydraulique et de la sculpture. Il se propose en particulier pour réaliser la statue équestre que le duc de Milan veut ériger à la mémoire de son père, Francesco Sforza. Cela n'a rien d'étonnant : « *Léonard connaît la statue équestre faite par Verrocchio à Venise,* le Colleone, *et celle élevée à Padoue par Donatello,* le Guattemelata », commente A. Loechel. « *Ludovic est un homme de guerre, une telle statue est la représentation même du pouvoir* ». Il obtient gain de cause, mais la statue ne sera jamais achevée. Ludovic le More a en tout cas des ambitions culturelles et aime à s'entourer d'hommes de lettres. Léonard s'impose progressivement à la cour lombarde. Il y participe entre autres à l'organisation de nombreux spectacles, et conçoit toutes sortes de machineries scéniques.

A cette époque, il se met à dessiner des armes perfectionnées. Il imagine en particulier des moyens de lutte marine, des dispositifs pour respirer sous l'eau… Autant de systèmes qui relevaient souvent du pur rêve technologique, précise aujourd'hui Paolo Galuzzi, directeur de l'Institut et du Musée des sciences de Florence : ils étaient irréalisables avec les moyens techniques de l'époque [5]. Par ailleurs, il continue les observations et les réflexions qu'il a amorcées à Florence dans le domaine hydraulique.

Passé au service de Charles d'Amboise, à Milan, Léonard peint *Sainte Anne, la Vierge, l'Enfant Jésus et l'agneau.*



A Milan, Léonard aura travaillé dix-sept ans pour les Sforza, puis sept ans pour les vainqueurs des Sforza.

L'eau va prendre une place considérable dans toute la pensée de Léonard. Elle symbolise la vie. L'eau est « *le sang de la terre* », celle-ci étant comparable à un organisme vivant : « *de même que de l'étang de sang proviennent les veines dont les branches s'étendent à travers le corps humain, ainsi l'océan remplit le corps de la terre d'un nombre infini de veines aqueuses* », écrit-il par exemple dans son *Traité de l'Eau*. Il commence ce traité vers 1490. Mais pas plus que d'autres (traités sur la voix, la peinture, le cheval, la vision, le vol des oiseaux, etc.), celui-ci ne sera achevé. La diversité des thèmes qu'il prévoit d'y inclure est étonnante : les chutes d'eau, les tourbillons, la pluie, les vagues, les mouvements de l'eau, les choses qu'elle charrie, etc. Il y expose ses méthodes de travail : « *En discourant sur l'eau, qu'il te souvienne d'invoquer d'abord l'expérience, ensuite le raisonnement* ». Ses textes témoignent de la même acuité du regard que ses dessins. Il déploie un tel effort de rigueur dans le verbe que chaque description suggère une image. Mais l'ambition de Léonard va au-delà de la simple description du réel.

Vers la fin des années 1480, note P. Galluzzi, « *on assiste à un tournant décisif dans sa carrière d'ingénieur. […] Il acquiert la conviction que l'expérience ne pourra le guider que jusqu'à un certain point. […] Résoudre les problèmes posés […] présuppose que l'ingénieur connaisse avec exactitude l'élément eau, qu'il en connaisse les lois* » [5]. Parallèlement, Léonard exerce des activités d'« urbaniste » et d'architecte. L'architecture a toujours été l'une de ses passions. Il présente un projet de réaménagement de la ville de Milan, qui compte déjà quelque 200 000 habitants.

Avec l'ingénieur siennois Francesco di Giorgio, il est également consulté sur le projet de construction de la cathédrale de Pavie. Enfin, pendant sa période milanaise, il s'attelle à la peinture de la *Vierge aux Rochers* et de la *Cène*. Ce dernier tableau, commencé en 1495, lui est commandé par Ludovic le More. Mais une fois de plus, il désespère ses commanditaires tant il le peint lentement. Il faut dire que sa conception de la peinture est, elle aussi, fondée

5 – Paolo Galluzzi, *Les ingénieurs de la Renaissance, de Brunelleschi à Léonard de Vinci*, Instituto e Museo di Storia della Scienza, Firenze - Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris - Giunti, 1995.

sur cette constante exigence de vérité dans la représentation. Ses écrits en témoignent : « *Veux-tu voir si l'effet général de ta peinture correspond à l'objet représenté d'après nature, prends un miroir et place-le de façon à réfléchir l'objet réel, puis compare le reflet à ta peinture et considère avec soin si le sujet des deux images est conforme à toutes les deux, particulièrement au miroir. On doit prendre le miroir pour maître [...]* ». Contrairement à Michel-Ange, dont l'expression artistique vise un éloge de la création, précise A. Loechel, la beauté léonardienne est intimement liée à la véridicité de la représentation du réel.

D'AUTRES RAISONS contribuent à ralentir son rythme. Il mène en effet des travaux en optique, en horlogerie, en anatomie, en acoustique, en géologie, en botanique, en mécanique, etc. Il se passionne également pour les mathématiques, grâce à sa rencontre, vers 1496, avec le moine franciscain Luca Pacioli. Celui-ci lui fait en particulier découvrir les travaux d'Euclide. Il passe d'un sujet à l'autre, le décryptage de ses manuscrits devenant un véritable parcours labyrinthique.

Dès lors, chaque page commence avec une intention, une question, « *mais cette question contient une possibilité de déviation* », commente P. Galluzzi, « *alors il ouvre cette déviation. Celle-ci ouvre encore une possibilité de parenthèse, il l'explore, et ainsi de suite. Il en oublie donc la première question pour suivre des directions latérales* » [6]. C'est ainsi que des mouvements de l'eau, il passe aux mouvements de l'air, car il en perçoit les analogies, puis au vol des oiseaux, à la machine volante, etc.

L'idée de fabriquer une machine volante hante Léonard depuis ses années florentines. Nombreux sont les feuillets où il tente de comprendre les mécanismes du vol des oiseaux, persuadé qu'il pourra en déduire des dispositifs permettant à l'homme de voler. Là encore c'est grâce au dessin qu'il expérimente ses idées, les mots ne pouvant en aucun cas, affirme-t-il, « *égaler la figure complète que restitue le dessin* ». Alors que ses textes ne sont que fragments, chaque dessin révèle son obsession du détail et de la perfection. Chaque dessin reflète sa conviction que la représentation visuelle, mieux que les mots, ouvre la voie vers la compréhension du réel.



J. G. ROSS - RAPHO

A Rome, où Raphaël et Michel-Ange étaient au faîte de leur gloire, Léonard ne resta que trois-quatre ans. Il y fut protégé par Julien de Médicis.

En 1499, la fuite de Ludovic le More devant l'armée de Louis XII et l'occupation de Milan par les Français incitent Léonard à quitter la ville. Il s'arrête à Mantoue, puis à Venise. En 1501, il regagne Florence, d'où les Médicis ont été chassés. Il est accompagné de Luca Pacioli et de Salaï. Alors âgé de dix-neuf ans, ce dernier – un garçon « *ravissant de grâces et de beautés* », selon Vasari –, a été adopté par Léonard à Milan, en 1490. Il l'emmènera partout, jusqu'en France.

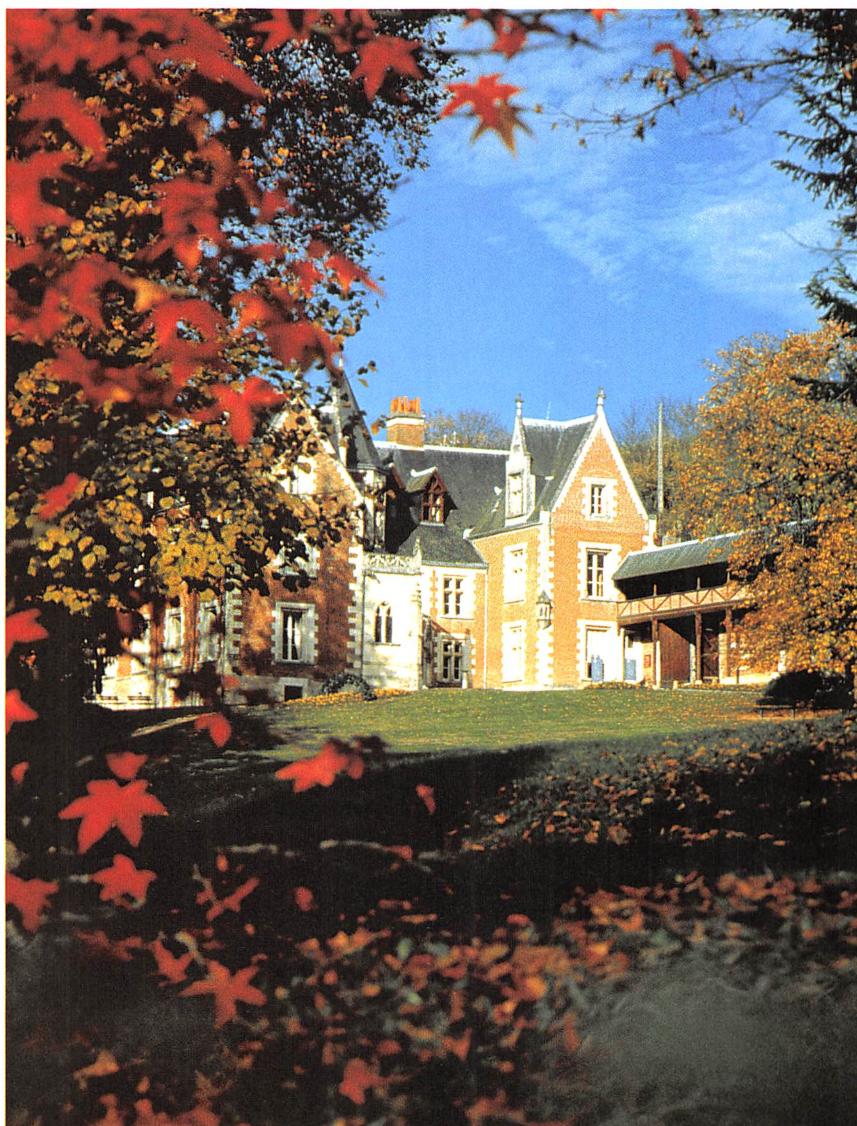
Léonard reste dans la nouvelle république florentine jusqu'en 1506, hormis une petite interruption comme ingénieur militaire au service de César Borgia. Cela lui donne d'ailleurs l'occasion de rencontrer Machiavel. C'est à Florence que commande va lui être faite du tableau de *La Vierge, Saint-Anne et l'enfant Jésus* (longuement commenté par Freud), et de *La Bataille d'Anghiari*. Cette fresque, qui devait mesurer vingt mètres sur huit, il ne l'achèvera jamais. Il commence également la peinture de *La Léda* [7] et de *La Joconde*. Puis il repart vers Milan, cette fois au service de Charles d'Amboise.

Pendant ce temps, il poursuit ses études sur le vol des oiseaux, sur l'eau, fait des propositions d'aménagements fluviaux à Florence, puis à Milan. Là, il est également consulté pour des travaux d'architecture. Il continue ses études d'anatomie, qu'il a l'intention de réunir dans un traité. Les dizaines de planches qu'il a réalisées à partir de dissections de cadavres doivent lui servir à comprendre la « mécanique » de la « machine humaine » : « *Toi qui veux par des mots révéler la figure de l'homme avec ses membres dans leurs*

6 – Entretien avec Paolo Galluzzi, *Les Chemins de la connaissance*, France Culture, 14 mai 1996.

7 – Ce tableau a disparu. Il n'en reste que des copies contestées.

Comblé d'honneurs par François Ier, son hôte, Léonard passa les trois dernières années de sa vie dans le château du Clos Lucé.



LE CLOS LUCÉ

diverses attitudes », écrit-il, « *bannis cette idée, car plus ta description sera minutieuse [...], plus tu t'éloigneras de la connaissance de la chose décrite. Donc il est nécessaire de figurer en même temps que de décrire* ».

Comme n'importe quelle machine, l'homme-machine doit en outre pouvoir s'appréhender à partir de mécanismes élémentaires. Léonard s'interroge aussi sur la nature spécifique des corps animés. Rien d'étonnant alors à ce qu'il fabrique des automates (des animaux articulés capables de se mouvoir grâce à un mécanisme d'horlogerie).

La débâcle française va sonner le glas de son séjour à Milan. En 1513, Léonard reprend la route et se dirige cette fois vers Rome. Il est encore en compagnie de Salaï, et d'un autre élève, Francisco Melzi. Ce jeune homme de bonne famille est tombé sous le charme du maître (et réciproquement sans doute). Toutefois, Léonard ne trouve guère sa place dans cette ville où Raphaël et Michel-Ange sont au faîte de leur gloire. Il accepte donc l'invitation de François 1er, qui l'accueille au manoir de Cloux (aujourd'hui Clos-Lucé), non loin d'Amboise.

Léonard est alors âgé de soixante-quatre ans. Dans ses bagages, il transporte tous ses carnets ainsi que trois tableaux, *la Joconde*, *la Saint-Anne* et le *Saint Jean-Baptiste*. En France, il continue de participer à l'organisation de fêtes et à proposer des plans d'aménagement des rivières. On le consulte sur des projets architecturaux (en particulier sur la construction d'un château à Romorantin). Même le château de Chambord, selon A. Loechel, pourrait avoir été conçu selon ses plans.

Avant de mourir, le 2 mai 1519, il désigne Francisco Melzi comme son exécuteur testamentaire et lui lègue tous ses écrits. Ce dernier les conserve précieusement jusqu'à sa mort, en 1570. Les choses en iront ensuite tout autrement.

La dispersion des manuscrits de Léonard n'a évidemment pas facilité la compréhension du personnage et de son œuvre par la postérité. Même sa beauté et son charme, tant exaltés par ses contemporains, nous échappent : il ne nous reste de lui qu'un autoportrait dessiné à la sanguine lorsqu'il avait soixante ans. L'historiographie a hésité, au cours des ans, entre son idéalisation outrancière et une réduction excessive de son apport à l'art, à la science et à la technique (voir l'article d'Hélène Vérin p. 82). Il est vrai que sa curiosité infatigable et sans exclusive l'a conduit à une réelle démarche encyclopédique. Une telle dispersion suffit-elle à expliquer l'inachèvement d'une grande part de ses œuvres ?

Cette répétition de l'inachèvement, qui intéressera fort les psychanalystes, apparaît en effet comme une constante dans l'œuvre de Léonard. Peut-être veut-il se justifier lorsqu'il écrit que « *réfléchir est une œuvre noble, et réaliser un acte servile* ». Quoi qu'il en soit, Léonard s'est peut-être senti en décalage par rapport aux milieux cultivés qu'il côtoyait lors de sa jeunesse florentine, en raison de son histoire personnelle. Et si c'est notamment par le dessin qu'il va exprimer son intelligence du monde, toute sa vie semble le reflet d'une interrogation sur les limites du langage, d'une volonté d'établir un lien entre théorie et applications, d'une tension entre le « dire » et le « voir ». ■

POUR EN SAVOIR PLUS

Les Carnets de Léonard de Vinci, Préface de Paul Valéry, Gallimard, 1994 (1re édition 1987).



Léo
la

Le scaphandre et le roulement à billes, le parachute et le char d'assaut, l'écluse et la bicyclette : que n'a-t-il pas inventé ? Bien longtemps après sa mort, Michelet le qualifiera de « *frère italien de Faust* ». Mais de son vivant déjà, il incarnait la figure mythique du génie universel. « *Léonard de Vinci n'est pas seulement un excellent peintre, mais un véritable Archimède* », aurait déclaré François 1er au sculpteur et orfèvre Benvenuto Cellini... On sait aussi qu'au fil de sa vie, il se consacra de plus en plus à son activité d'ingénieur, délaissant la peinture pour les machines.

De ses carnets, il nous reste aujourd'hui quelque six mille feuillets. Ils doivent représenter le tiers, environ, des documents qu'il légua, en 1519, à son élève Francesco Melzi. A la fin du siècle, le sculpteur Pompeo Leoni avait cru bon de démembrer cet héritage. Il avait séparé les notes et dessins technologiques et scientifiques des études artistiques et anatomiques. Cette mutilation agit aussi sur la mémoire. Le peintre s'était alors mis à tourner le dos à l'ingénieur. Il devint donc impossible de comprendre comment Léonard avait pu être l'un et l'autre. Indissociablement.

En 1651, les notes relatives à son activité artistique sont rassemblées dans un volume improprement intitulé, *Traité de la peinture*. On ne veut se souvenir, au temps des Académies, que de l'auteur de *La Cène* et de *La Joconde*, inlassablement copiées.

Il faudra attendre la fin du XIXe siècle pour voir publiés, et étudiés, le *Codex atlanticus* et le *Codex arundel*. Le premier, conservé à Milan, compte à lui seul près de 1 120 feuillets. Il livre la chronique enthousiaste des curiosités de Léonard. L'auteur y déploie l'éventail de tous ses projets scientifiques et technologiques. Le second, rassemblant 283 feuillets détachés de différents carnets, permet, lui, d'appréhender les recherches de l'ingénieur en optique, géométrie, mécanique et urbanisme. Avec l'exhumation de ce corpus technique, le temps des ingénieurs vient de se trouver un héros providentiel. Léonard prend alors figure d'inventeur de notre modernité.

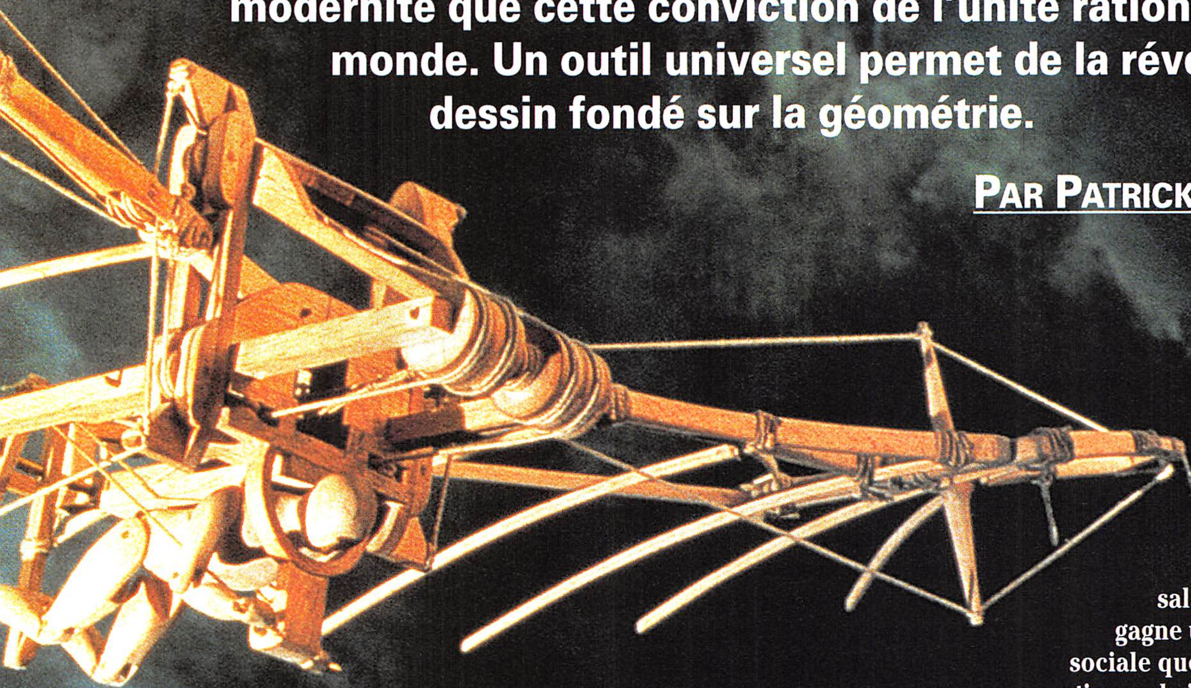
Comment rendre compte de l'infinie variété de ses préoccupations ? La première explication est simple, mais fondamentale. Léonard de Vinci est un ingénieur du *Quattrocento* italien. C'est donc un spécialiste de technologie générale, doué d'un savoir polytechnique, l'*ingenium*. Vitruve s'en était fait le théoricien ; Taccola, Francesco di Giorgio et Brunelleschi, les plus illustres représentants.

L'importance grandissante des ingénieurs dans l'Italie du XVe siècle doit évidemment beaucoup au climat culturel de la Renaissance : une

nard et machinerie lu monde

Dès lors que le monde est organisé selon les principes de la mécanique, il devient entièrement descriptible. Ce ne sont pas tant les machines de Léonard qui en font un précurseur de la modernité que cette conviction de l'unité rationnelle du monde. Un outil universel permet de la révéler : le dessin fondé sur la géométrie.

PAR PATRICK BOUCHERON

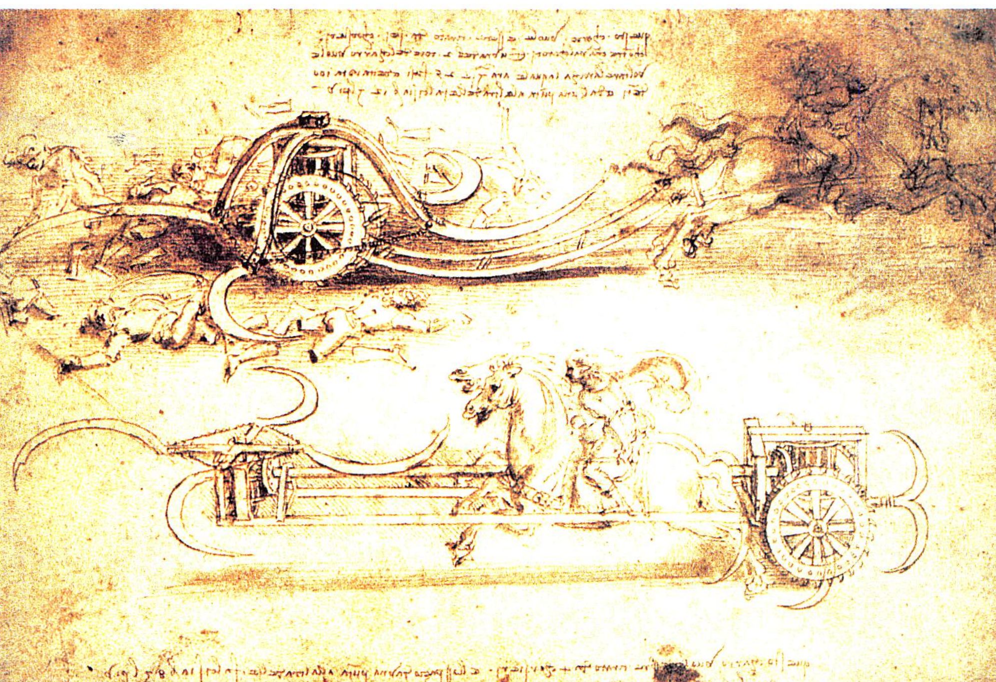


période de « *décloisonnement des savoirs* », comme l'a définie Panofsky. Un tel constat n'explique pourtant pas tout. Dans la montée en puissance des ingénieurs, le contexte politique de la péninsule compte aussi. Les cités et les Etats princiers territoriaux sont engagés dans une course à la modernité sur le plan administratif, militaire, politique, artistique. Pour creuser des canaux, jeter des ponts sur les rivières, lever des fortifications, imaginer les moyens de détruire celles de leurs adversaires, les princes ont besoin de ce maître de la machine qu'est l'ingénieur. Au service de l'Etat, protégé par la faveur princière, gratifié d'un salaire fixe, l'artiste y gagne une reconnaissance sociale que le monde des corporations urbaines lui refuse.

Il ne faut donc pas s'y tromper : c'est d'abord à cette position sociale qu'aspire Léonard, le fils illégitime d'un notaire toscan.

Lorsque, vers 1482, Léonard quitte Florence, pour briguer le service du duc de Milan, il adresse à Ludovic le More un *curriculum vitae* que, bien plus tard, les historiens ont lu comme

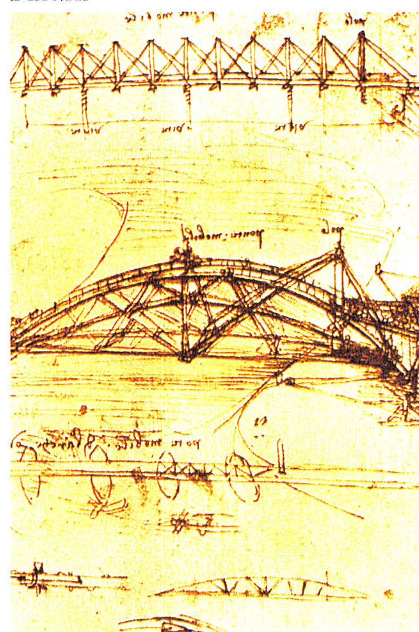
MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES DE FLO-



MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES DE FLORENCE



LE CLOS-LUCE



un manifeste de cet art universel. En réalité, le Florentin cherche à se présenter à son futur patron sous son meilleur jour. Il fait donc l'inventaire de toutes ses compétences, montre l'étendue d'une science qu'il *« offre de mettre à exécution »* pour le prince. Or, que privilégie-t-il dans cet « autoportrait » ? Essentiellement l'art militaire.

Il a dans ses cartons, fait-il savoir, un modèle de pont solide et léger, facile à transporter et résistant au feu de l'ennemi… Il sait aussi, lors des sièges, comment tarir l'eau des fossés et comment utiliser les machines de guerre… Il connaît les méthodes pour détruire les citadelles… Il a des modèles de mortiers, de chars couverts et indestructibles, de bombardes et de catapultes… Il est capable d'inventer toutes sortes de machines tant pour l'attaque que pour la défense… De surcroît, mais c'est seulement le dixième et dernier point, il est aussi architecte, peintre et sculpteur.

Qu'en conclure ? Le propos de Léonard est ici tout entier tendu vers un but de persuasion. Il s'agit de se faire remarquer du prince, en lui présentant la gamme la plus étendue des talents qui pourraient lui être utiles. Sa lettre dresse donc moins la liste de ses propres préoccupations que de celles qu'il prête au duc de Milan. Léonard pense l'intéresser d'autant plus qu'il mettra en valeur ses compétences militaires. De fait, il vise juste. Pour le pouvoir princier, l'art de la guerre est en effet constitutif de la compétence de l'ingénieur. Ainsi, tout au long de sa vie, Léonard réagit-il, en professionnel zélé, aux diverses sollicitations de ses employeurs.

Au service du duc de Milan, Léonard dessine toutes sortes de dispositifs militaires, notamment des chars armés de faux (ci-dessus) et des ponts. Il en existe plusieurs, dont un pont léger et mobile, monté sur une roue, et un pont pivotant (ci-contre). Ce dernier implique une analyse poussée des contraintes statiques : un contrepoids est prévu à l'arrière du pont, pour rétablir l'équilibre de charges autour de l'axe de rotation, lorsqu'il est mis en mouvement.

Pendant son premier séjour milanais (1482-1499), il dresse des plans de fortifications, dessine des machines de guerre, propose des projets architecturaux. Son travail d'ingénieur apparaît toutefois dominé par deux préoccupations principales. Là encore, elles sont plus le reflet d'exigences politiques que de choix personnels.

Il s'agit d'abord de la vaste entreprise d'aménagement hydraulique de la Lombardie, pour laquelle Léonard dresse des relevés, imagine des systèmes d'écluses, de régulation du débit des canaux ou de drague assurant leur entretien. Il étudie le fonctionnement des bouches réglables d'alimentation d'eau du canal de la Martasena. Cet ouvrage avait été creusé dans les années 1460, sous la direction de l'ingénieur Bertola da Novate, pour relier Milan au lac de Côme en dérivant l'Adda. En 1490, à Pavie, il dessine des écluses dont les portes placées en chevron permettent de résister à de fortes pressions. Avec la Vénétie, le Milanais est alors le lieu d'expérimentation de l'hydraulique de la Renaissance.



LE CLOS-LUCE

Léonard, cela ne fait aucun doute, est stimulé par ces défis techniques. Il n'est pas non plus insen-

Dressée par Léonard en 1504, cette carte montre un projet d'aménagement de la vallée de l'Arno, dans la région de Pise. C'est plus tôt, en Lombardie, qu'il s'est initié à l'hydraulique . Il avait alors conçu différents systèmes de régulation et d'entretien des canaux.


MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES DE FLORENCE

sible à la dimension politique des problèmes que le pouvoir princier lui demande de résoudre. Assurer le débit régulier de l'eau, contrôler ses usages, organiser son partage équitable : autant d'exigences qui prennent leur sens dans une idéologie du *bon gouvernement*.

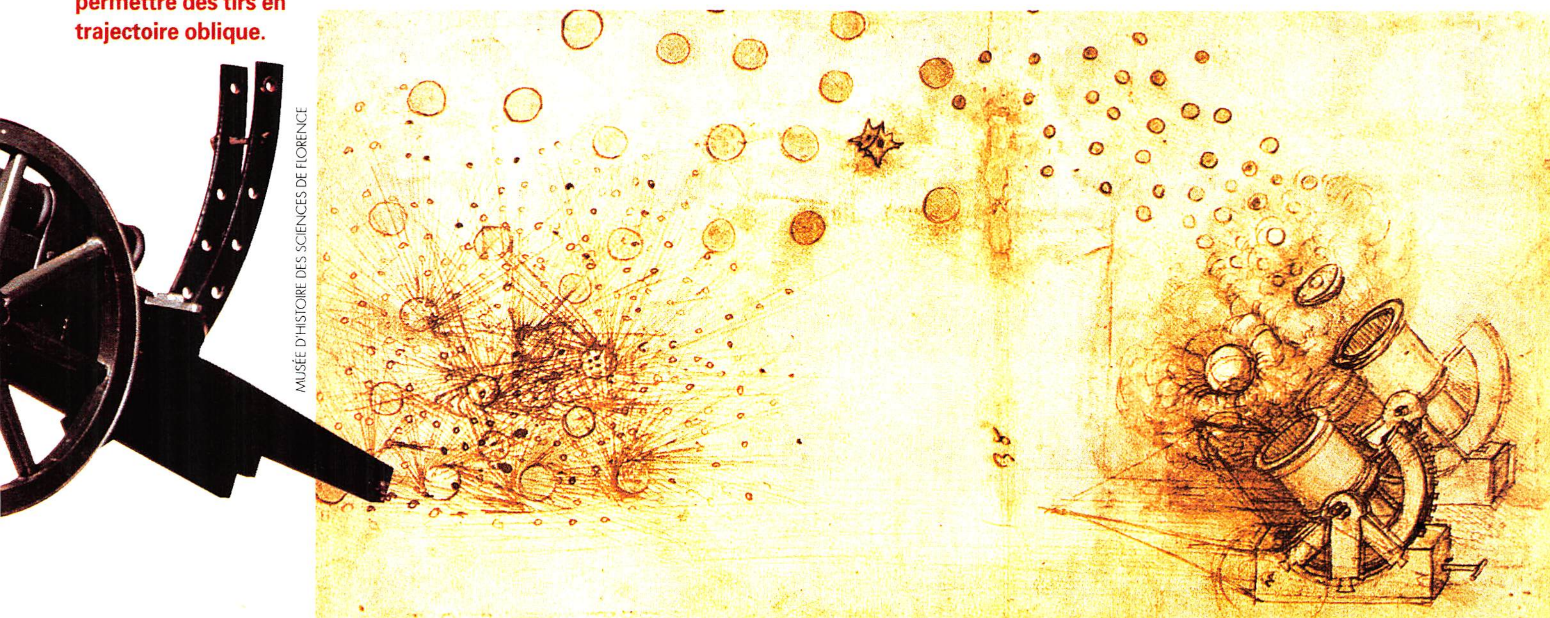
La seconde préoccupation de Léonard, à Milan, porte sur la conception de machines pour l'industrie textile et métallurgique. Il s'associe donc au grand effort de mécanisation du travail qui caractérise la capitale lombarde du second XVe siècle. Songeons, par exemple, à ses dessins de fraiseuse hydraulique, de métiers à tisser, à ses machines pour la fabrication des limes ou à son procédé de fabrication des miroirs concaves.

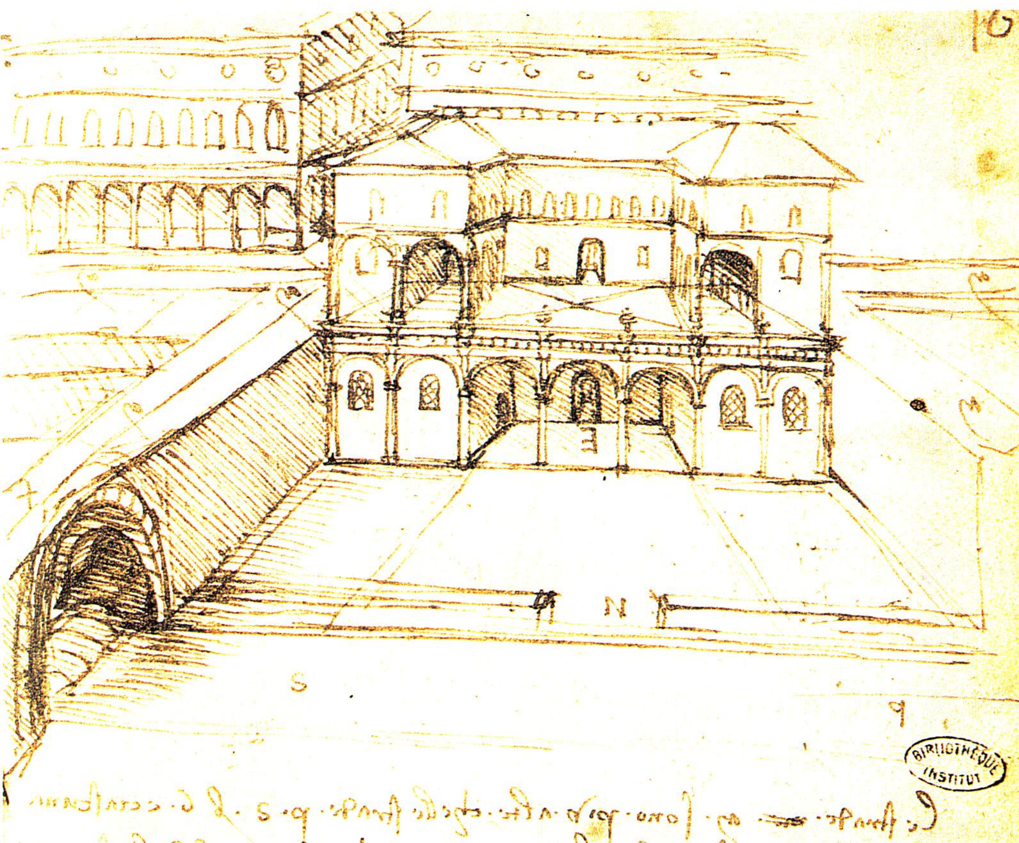
Passé au service de César Borgia en 1502, Léonard prête son talent aux ambitions militaires de son sulfureux mécène. Mais revenu au service de Julien de Médicis à Florence, le voilà à nouveau occupé par des problèmes plus pacifiques : assèchement des marais, conception d'une machine à tresser les cordes, chauffage des cuves des teinturiers en utilisant l'énergie solaire captée par un miroir parabolique. Quelques années plus tôt, en 1499, c'était pour la baignoire de la duchesse Isabelle d'Aragon qu'il avait imaginé un ingénieux système de réglage d'eau chaude.

Ainsi voit-on Léonard de Vinci, ingénieur salarié des cours princières, ballotté au gré des fantaisies ou des ambitions de ses puissants protecteurs. L'étendue de ses compétences provient d'abord de là : elle est, pour lui, une sorte d'obligation professionnelle.

L'ingénieur ne fait pas que répondre à des commandes. Sa curiosité est en effet universelle. Elle a soulevé l'admiration. Pourquoi le ciel est-il bleu ?

Léonard a-t-il inventé les redoutables armes à fragmentation ? Ce dessin le prouve. Pour accroître la densité de projectiles, il imagine des boulets, lancés par des mortiers lourds, et qui explosent en une multitude de fragments au moment de l'impact. La maquette (ci-dessous), quant à elle, est celle d'un projet de canon dont l'affut, réglable en hauteur, est également orientable pour permettre des tirs en trajectoire oblique.


MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES DE FLORENCE



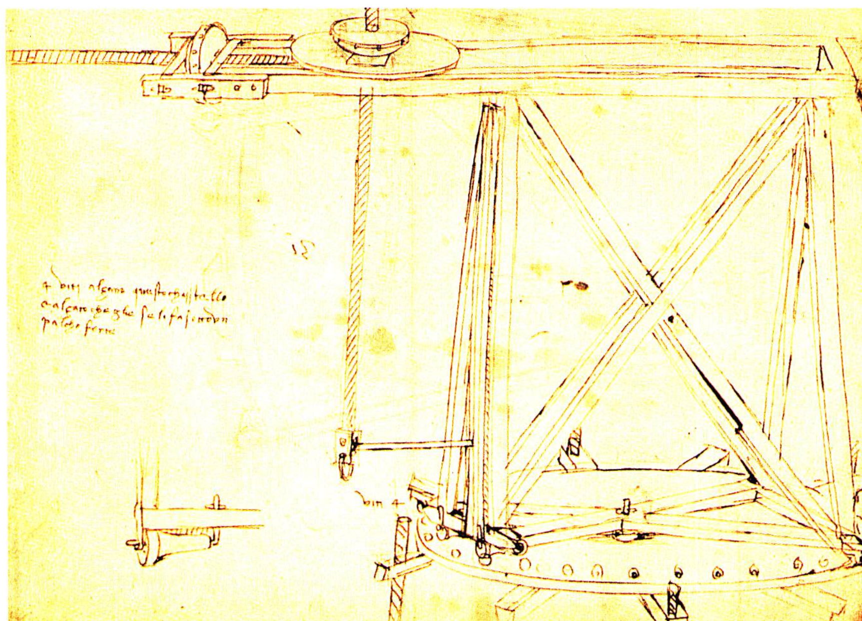
Impressionné par le Dôme de Florence, Léonard reproduit la grue de la lanterne. Grâce à des systèmes de vis, celle-ci peut déplacer la charge verticalement et horizontalement. Plus tard, il concevra un projet d'urbanisme pour Milan (en haut).

Comment volent les oiseaux ? Pourquoi le soleil couchant grossit-il à l'horizon ? On n'en finirait pas de citer les questions qu'il se pose.

Quand Léonard travaille pour lui-même, c'est toujours intrigué par un problème particulier. Raison pour laquelle certains historiens des techniques lui refusent aujourd'hui une place de précurseur dans la révolution scientifique du XVIe siècle. Il n'a effectivement jamais tenté de rassembler un corpus systématique de connaissances. Il n'a jamais éprouvé la nécessité de communiquer, d'expliquer et de prouver ses propres découvertes.

Il ignore d'ailleurs l'imprimerie – la plus grande innovation de son temps – et n'écrira aucun des grands traités qu'il annonce pourtant si souvent dans ses carnets. Léonard apparaît ainsi comme l'homme de la somme impossible, d'une encyclopédie éclatée à usage strictement personnel.

Homme universel ? Plutôt homme à tout faire des cours princières, dans la tradition d'un savoir technique médiéval. C'est d'ailleurs ainsi que nous le révèlent la plupart de ses manuscrits. Noircis de ce qu'il appelle lui-même son « *griffonnage confus* », ces derniers consignent, au fil de la pensée, des mécanismes, des procédés, des façons de faire… Quand Léonard de Vinci se définit comme un « *homme sans lettres* », il revendique sa formation intellectuelle et technique prodiguée,





loin des académies et des universités, dans les ateliers florentins.

L'artiste de la Renaissance, en effet, n'est en rien ce génie solitaire que l'histoire de l'art du XIXe siècle a mythifié. C'est avant tout un chef d'atelier, entouré d'apprentis, qui tente de rationaliser ses activités. On sait que le jeune Léonard de Vinci, arrivé à Florence vers 1470, fait son apprentissage dans la *bottega* de Verrochio. De toutes, c'est sans doute la plus importante et la plus prestigieuse.

Le maître – et, vraisemblablement, son élève Léonard – n'ont alors qu'une préoccupation : l'achèvement du grand chantier de la coupole de Santa Maria del Fiore. Elle fut la grande aventure technologique de la seconde moitié du *Quattrocento*. La lanterne – une prouesse architecturale – est en place depuis 1461. Il reste cependant à la couronner de la lourde sphère de cuivre qui doit culminer à quelque cent mètres de hauteur. Pour concevoir de telles entreprises, les maîtres d'atelier sont obligés de mobiliser tout le savoir empirique de leur temps (techniques de fonte, perspective, géométrie).

Que sont en fait ces ateliers florentins ? De véritables laboratoires industriels. Tous les métiers s'y croisent : le tailleur de pierre et le fondeur de bronze, le peintre de fresques et l'orfèvre. Répondant au plus vite à la commande artistique, dans un contexte de concurrence effrénée, les maîtres et leurs apprentis sont engagés dans une logique de partage des tâches et de rationalisation du travail. Leurs mécènes sont de surcroît soucieux d'avant-garde. Ils veulent aussi des innovations. Loin de n'être qu'une « usine » bruyante et un centre de formation, l'atelier devient aussi un centre de circulation de toutes les sciences et techniques nouvelles qui permettront aux maîtres d'améliorer leurs savoir-faire.

C'est là que Léonard de Vinci apprend les rudiments de l'art des machines. Fasciné, il dessine dans ses carnets les échafaudages et les engins de levage conçus par Brunelleschi. Ces derniers sont d'ailleurs encore en place sur le grand chantier de la cathédrale de Florence.

Léonard est l'héritier de cette tradition d'atelier. Il ne cessa jamais de collecter les savoirs techniques de son temps. Il dessine ce qu'il voit, à Florence ou ailleurs. Mais aussi ce qu'il lit. Il prend des notes sur les machines de guerre du *De re militari,* de Roberto Valturio (composé vers 1450 et publié en 1472). Il étudie l'œuvre de l'ingénieur Taccola. Plume à la main, il lit les traités de Francesco di Giorgio. Enfin, il consigne dans ses carnets ce qu'il a entendu, capitalisant ainsi la tradition orale des artisans spécialisés. « *Trouve un maître d'eau et fais-toi expliquer comment protéger les rives et combien cela coûte* », note-t-il, pour lui-même, dans ses carnets milanais.

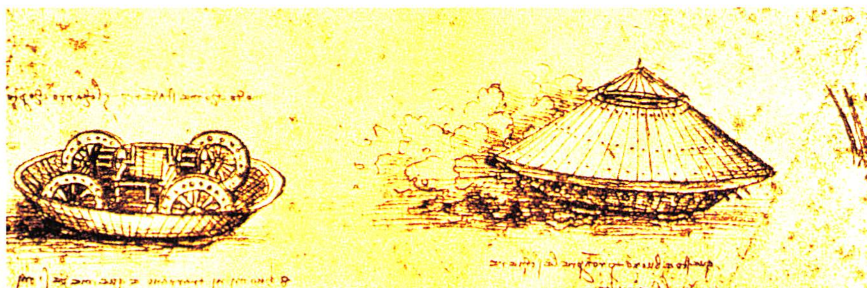
On se doute que cette méthode tout empirique complique d'autant le travail des historiens lorsqu'ils cherchent, obstinément, à attribuer au génie propre de Léonard la paternité de telle ou telle invention.

Le problème vaut également pour les projets architecturaux. Léonard dessine-t-il ce qu'il voit ou ce qu'il prévoit ? Réfléchit-il sur l'existant ou sur le possible ? S'abandonne-t-il à des « rêves technologiques » ? Sans doute tout cela à la fois, comme l'indique clairement l'étude comparée des différents traités de la Renaissance. Telle machine – on a pu le prouver – ne provient pas de l'imagination de Léonard, mais de son observation ou de ses lectures : les engins de guerre, le char d'assaut par exemple, sont inspirés des dessins de Guido de Vigevano, ou de ceux de l'ingénieur allemand Konrad Kyeser.

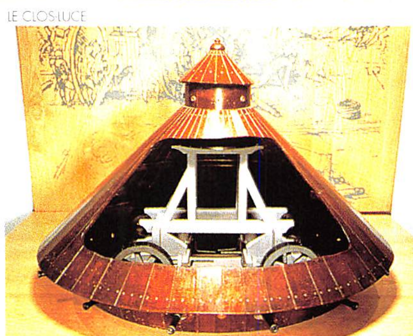
Il arrive, cependant, que Léonard ne se contente pas de recopier. Il étudie aussi les améliorations techniques sur les machines de ses prédécesseurs. En cela, il se situe toujours dans la tradition du savoir empirique médiéval. Ce dernier en effet se transmet encore fort tard à l'époque moderne. De la *Pirotechnia* de Vannocio Biringuccio (1540) aux *Diverse et artificiose macchine* d'Agostino Ramelli (1588), les livres de

Le *Codex de Madrid* et les éléments de machine

En 1966, l'historien Ladislao Reti découvre, sur des rayonnages oubliés de la Bibliothèque nationale de Madrid, deux manuscrits inédits et autographes de Léonard de Vinci.
Le *Codex de Madrid*, publié en 1974, a profondément modifié l'image de Léonard ingénieur. Et ce, alors même que la tendance des historiens, sans doute grisés par leur audace de briseurs d'idole, consistait à remettre en cause l'originalité de son apport à la science moderne.
Le *Codex de Madrid* diffère totalement des autres manuscrits, qui sont le plus souvent des carnets de travail où Léonard jetait, pêle-mêle, les idées les plus diverses.
Ici, avec un art admirable de la mise en page, il met au propre une série de dessins représentant de manière systématique engins et mécanismes, de la vis à la roue dentée, des joints aux charnières, des chaînes aux poulies. Ces représentations (désormais considérées comme les matrices du dessin technique moderne) sont accompagnées de commentaires précis, présentant les caractéristiques des mécanismes, estimant leur force, évaluant leurs frottements.
On connaissait le génie ombrageux et bouillonnant, le *Codex de Madrid* nous renvoie désormais l'image d'un Léonard méthodique. Les manuscrits du *Codex de Madrid* comportent en effet un traité des éléments de machines, auquel Léonard fait allusion dans certains de ses carnets, mais dont les historiens mettaient en doute l'existence.
« Éléments » : le terme renvoie aux *Éléments* d'Euclide, qui définissent les principes de la géométrie. Faisant l'inventaire des mécanismes possibles, Léonard, dessinateur et mathématicien, veut définir les fondements généraux de la mécanique.



LE CLOS LUCE



Pour déplacer ce monstre et ses canons de bordés, il aurait fallu huit hommes mettant en œuvre des manivelles solidaires des roues via des engrenages.L'ancêtre du char d'assaut, dit-on.

machines comportent à la fois descriptions d'engins existants et projets d'engins à construire, sans qu'il soit toujours aisé de les distinguer entre eux. « *Souviens-toi de la manière dont on a soudé la boule de Santa Maria del Fiore* », note Léonard, vers 1510. Ces mots témoignent que, tout âgé qu'il soit à cette date, il demeure fidèle à ce savoir technique et à ces pratiques d'atelier qui ont fait la renommée des ingénieurs de la Renaissance.

Au moment où il les écrit, il a pourtant accompli un tour de force intellectuel, destiné à modifier radicalement le métier d'ingénieur dans l'Europe du XVIe siècle : la synthèse entre la pratique empirique des experts en machines du Moyen Age et les acquis fondamentaux de la géométrie.

Contre les lettrés qui croient découvrir la vérité du monde dans les traités de philosophie, il s'est affirmé, avec l'orgueil de l'autodidacte, « *disciple de l'expérience* ». La seconde partie de sa vie, il change de cible. Ses attaques s'adressent à « *ceux qui s'éprennent de la pratique sans la science,* (et) *sont comme les pilotes qui se mettent à naviguer sans gouvernail ni boussole et qui ne savent jamais exactement où se diriger* ». Dans ses dernières années, Léonard s'oriente, avec obstination, vers les mathématiques, l'anatomie, la mécanique. Que cherche-t-il si passionnément ? A fonder sa pratique d'ingénieur sur des principes généraux.

Ce changement de cap dans la conception que Léonard se fait de son *ingenium* peut être repéré avec précision. En 1496, il rencontre Luca Pacioli et se lie d'amitié avec ce célèbre mathématicien toscan, attiré à la cour des Sforza de Milan. Pacioli doit sa renommée à sa lecture et son commentaire des *Eléments* d'Euclide. Léonard se voit ainsi offrir les clefs de ce « *paradis des mathématiques* » qu'est – selon sa propre formule – la mécanique.

Ce faisant, Vinci ingénieur devient l'artisan de l'exaltation de son art. Il adopte une conception albertienne de « *l'art des machines* ». Soixante ans plus tôt, le grand humaniste Leon Battista Alberti avait fait de l'architecte Filippo Brunelleschi, inventeur de la construction perspective, le dédicataire de son traité *Della Pittura* (1434). Avec la perspective, l'architecture et la peinture deviennent des sciences globales de l'espace, fondées sur « *les vérités éternelles de la géométrie* ». La pratique de l'artiste change de statut. D'artisanale, elle accède au rang d'art libéral.

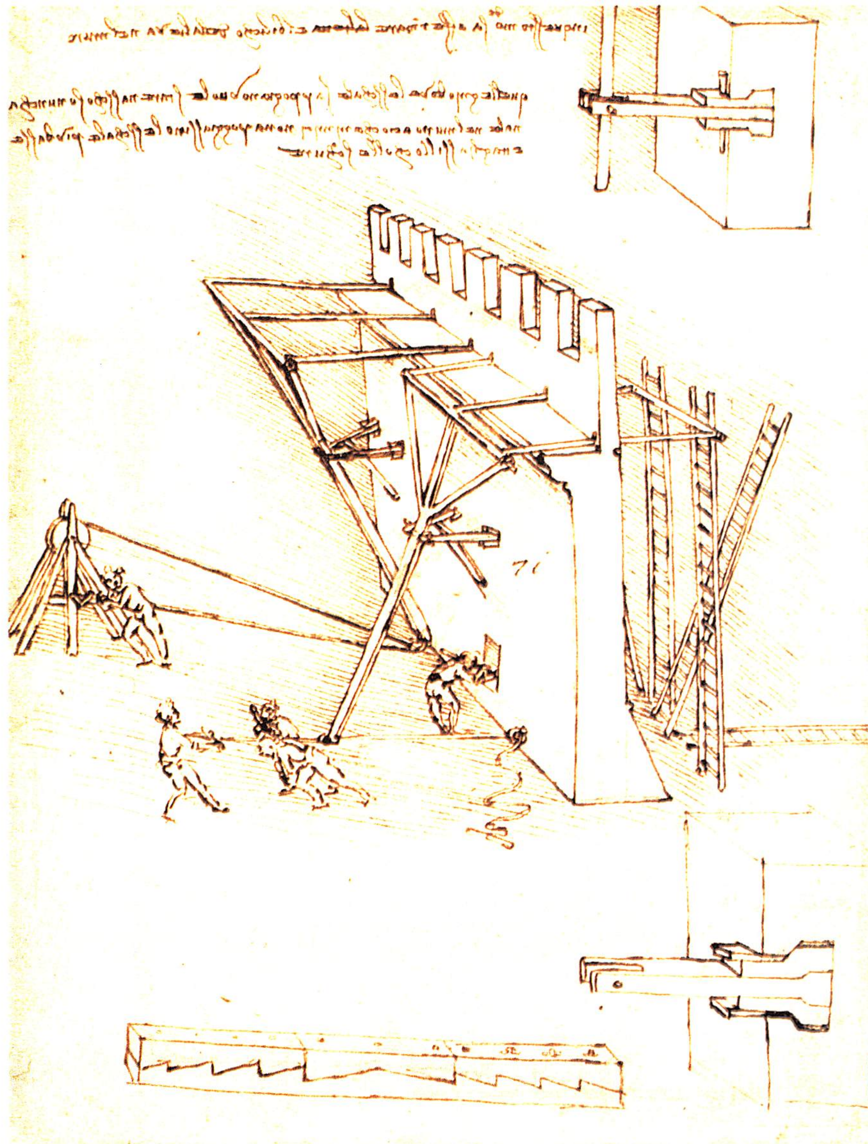
On comprend que l'enjeu de la « conversion » de Léonard de Vinci à la science mathématique ne concerne pas seulement l'histoire du progrès scientifique. Elle porte aussi sur la reconnaissance sociale de l'ingénieur, maître des machines. Il n'est donc pas inopportun d'évoquer l'autre grande rencontre de l'année 1496 : celle de Baldasare Castiglione, futur auteur du *Courtisan*. A Milan, Castiglione initie Léonard au calcul des enjeux de pouvoir propre aux cours princières d'Italie. Pour obtenir la faveur des puissants, Léonard comprend sans doute qu'il doit fonder sa pratique sur une théorie globale des principes mécaniques. Il passe ainsi du statut de praticien à celui de théoricien.

Que se passe-t-il dès lors ? On le voit certes, à partir de 1496, poursuivre ses travaux d'hydraulique et de génie militaire, dessiner des machines, toujours plus ingénieuses, perfectionner sans cesse ce legs technologique dont il se sent dépositaire. Mais son ambition est désormais ailleurs : il cherche à fonder en raison la cohérence de sa pratique d'ingénieur, faite de mille sollicitations et de mille curiosités. Bref, cette fois, il s'agit moins pour lui de construire des machines que de rendre compte de la grande machinerie du monde.

Héritier d'une pensée analogique typiquement médiévale, Léonard de Vinci a eu l'intuition d'une harmonie universelle. Celle-ci est fondée sur les « quatre puissances de la nature » : le mouvement, le poids, la force et la percussion. On ne doit chercher, dans cette conception du monde, aucune intuition nouvelle et fondamentale. La physique de la force (*impetus*) est, d'Albert de Saxe à Nicolas de Cues, un principe majeur de la science médiévale. Chez ce dernier penseur, précisément, le monde n'est plus une structure figée reflétant l'immuabilité du Créateur. Il est un ensemble de forces où le mouvement détermine les formes des êtres. Point n'est besoin d'imaginer Léonard lecteur de Nicolas de Cues. Des ateliers florentins aux cours princières d'Italie du Nord, l'ingénieur



LE CLOS-LUCE



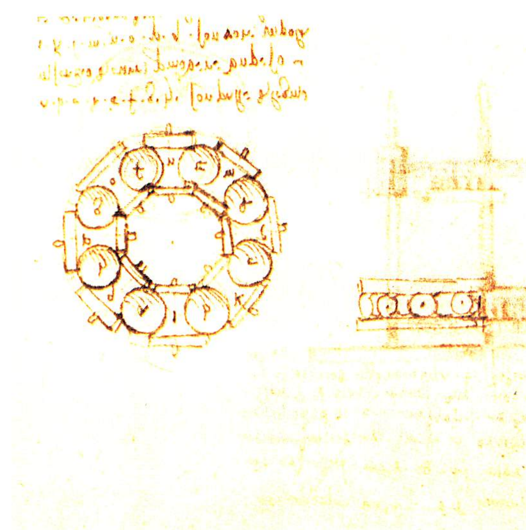
A travers ses multiples inventions, Léonard ambitionne la reconnaissance sociale de l'ingénieur. Ci-dessus, sa vis aérienne : en tournant autour de l'arbre central, deux hommes actionnent le mouvement de la vis. Ci-contre, son dispositif pour renverser les échelles d'assaut : un simple levier permet de dégager une longue barre de bois dissimulée dans la muraille.

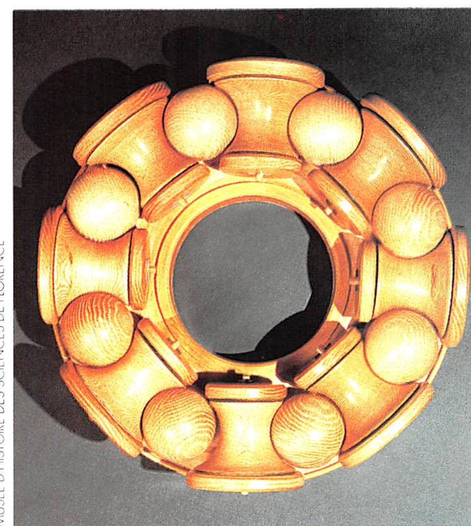
trouve partout, vivante, cette tradition intellectuelle.

Puisque le monde entier est mouvement, la mécanique permet d'en rendre compte, dans sa globalité. De l'horlogerie à l'hydraulique, de la mécanisation du travail à la conception d'engins de levage pour les chantiers de construction, tout entraîne Léonard de Vinci vers une pensée du mouvement universel.

Voilà pourquoi il se passionne tant pour la vis. Il en dessine, inlassablement : des vis inversées et des vis sans fin, des vis concaves et des vis en boucles. Car la vis – que Brunelleschi avait largement utilisée pour ses engins du chantier de la cathédrale Santa Maria del Fiore de Florence – est comme la promesse d'une infinie démultiplication de la force. L'étudier, dessiner le mouvement harmonieux de ses spires, c'est, d'une certaine manière, analyser les forces naturelles dans leur ensemble.

D'où le passage aux tourbillons, qui le fascinent tout autant. Tourbillons d'eau, qu'il tente d'utiliser pour ses études de propulsion sous-marine et qu'Alberti, avant lui, avait appelés des





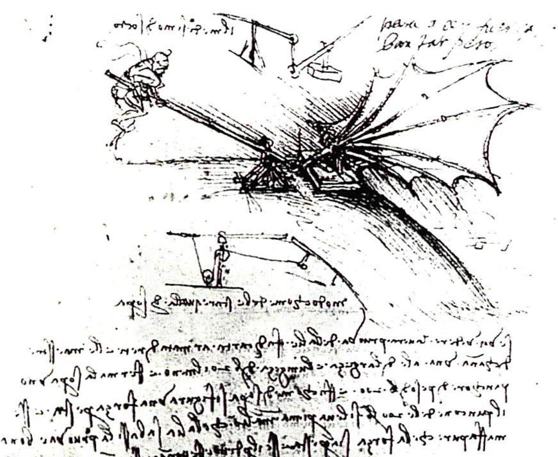
MUSÉE D'HISTOIRE DES SCIENCES DE FLORENCE



PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Les grands chantiers, l'hydraulique et l'hydrodynamique conduisent Léonard au concept de mouvement universel. En inventant l'anneau de glissement permettant aux billes de rouler sans se toucher, il minimise le frottement entre la couronne et la plate-forme d'appui. Les croquis des tourbillons d'eau ou de vent, qui le fascinent, illustrent sa volonté d'analyser les forces naturelles dans leur ensemble.

LÉONARD ET LA MACHINERIE DU MONDE



Convaincu que l'homme peut voler, Léonard imagine diverses machines volantes imitant le battement des ailes d'oiseau. *« Si l'expérience rate, n'y perds plus ton temps »,* commente-t-il.

EXPLORER - COLL. ES

« vrilles liquides ». Tourbillons de vent, dont la représentation figurée prend chez lui des accents hallucinés, voire cauchemardesques.

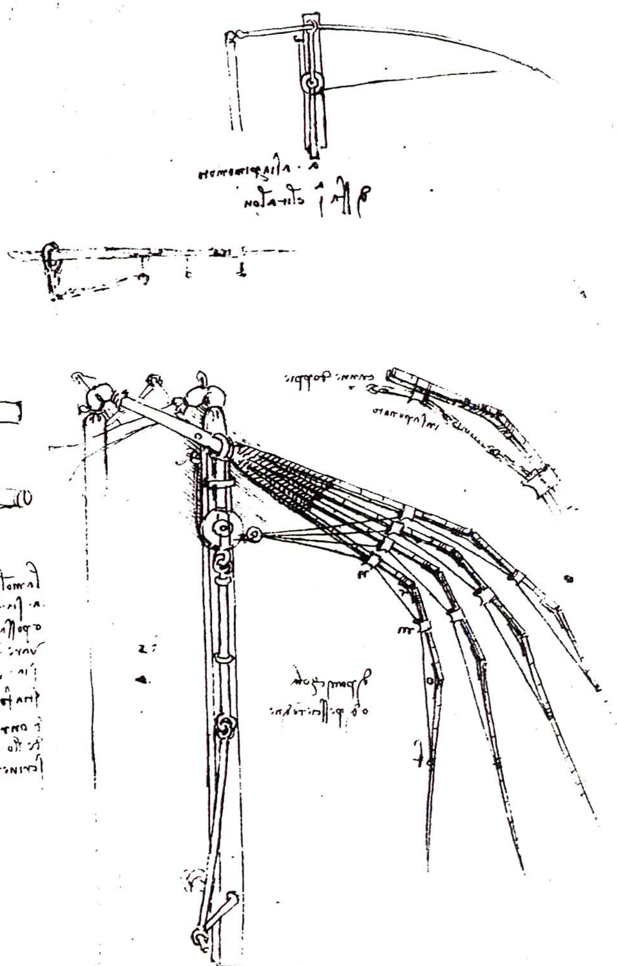
La certitude de l'unité fondamentale des principes mécaniques de la nature s'exprime avec éclat dans l'un de ses rêves technologiques les plus célèbres : celui des machines volantes. De son séjour florentin à sa retraite française, il aura tout essayé ou, plus précisément, tout dessiné. On trouve des croquis de machines à ailes mobiles actionnées par les bras, puis par les jambes, enfins des planeurs, dans les dernières années.

En 1505 encore, il rassemble ses études dans le *Codex Volo Ucelli.* Car il ne doute pas que l'homme puisse, un jour, imiter les possibilités naturelles des oiseaux. Pour preuve, ce qu'il écrit : *« L'oiseau est un instrument qui fonctionne selon des lois mathématiques ; fabriquer un tel instrument est du pouvoir de l'homme ».*

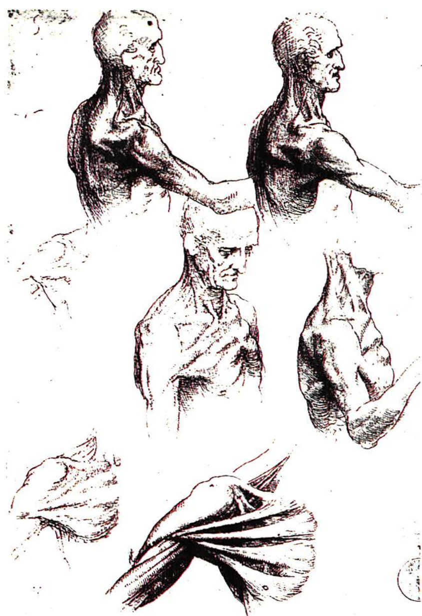
Si l'animal est une machine, le corps humain l'est aussi. Léonard de Vinci admire la grande machinerie humaine, au point de déclarer que certains n'en sont pas dignes : *« Il ne me semble pas que les hommes grossiers, de mauvaises mœurs et de peu d'entendement méritent un si bel instrument, ni des rouages si variés ».* Cette machine, il l'admire tant qu'il délaisse le pinceau pour le scalpel, et passe des heures *« en compagnie de cadavres tailladés et lacérés, horribles à voir ».*

Entre 1507 à 1508 , il s'adonne avec application à la dissection et à l'exploration systématique du corps humain. Il dessinera plus de deux cents planches anatomiques. L'homme, comme l'écrit l'historien Paolo Galluzzi, devient *« le champ d'application privilégié de la science mécanique de Léonard ».*

C'est bien, en effet, de mécanique qu'il s'agit. Lorsque l'ingénieur décrit l'axe de rotation de la cheville, il utilise le terme de « pivot ». Lorsqu'il dessine les articulations des membres supérieurs, c'est pour mettre en valeur leurs « os glanduleux » et étudier les mécanismes anti-frictions du corps humain, de la même manière qu'il conçoit joints universels et roulements à billes. Voilà pourquoi la science de Léonard culmine sans doute dans sa théorie des mouvements humains.

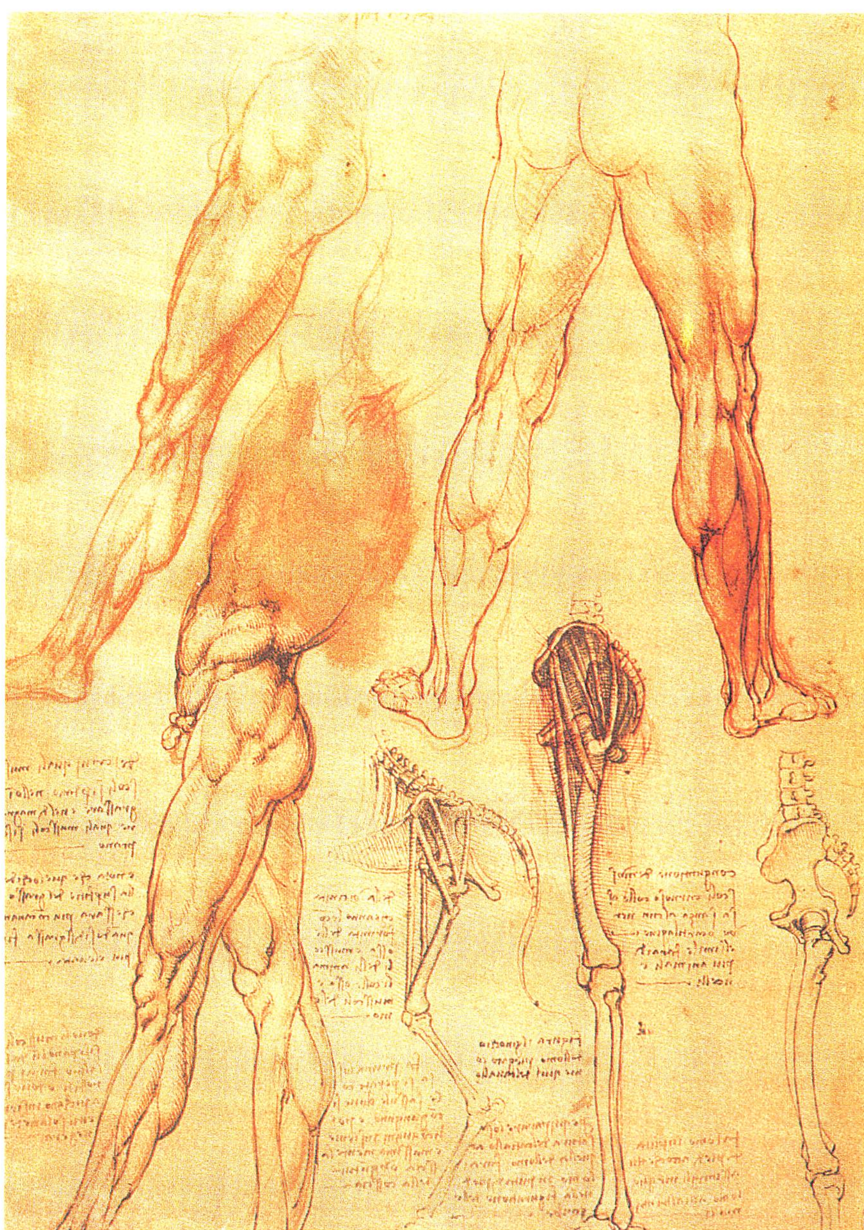


EXPLORER - COLL. ES



PALAIS DE LA DÉCOUVERTE

Pour un mécanicien, le corps humain n'est certes qu'une machine, mais la plus perfectionnée de toutes. Léonard consacre deux années à des dissections. Dans ses 200 planches anatomiques, qu'il dessine avec une infinie précision, il accentue systématiquement les aspects mécaniques des organes fondamentaux.



EDIMÉDIA - AKG BERLIN

Cette théorie n'a jamais été achevée, mais on peut la lire sous la plume d'un de ses continuateurs, le peintre Carlo Urbino. C'est en effet sur les notes et les dessins de Léonard que ce dernier, prend appui, lorsqu'il écrit son *Codex Huygens,* à la fin des années 1560.

Selon les mots d'Erwin Panofsky, Urbino apparaît donc comme l'« exécuteur testamentaire » de Léonard. Et si celui-ci n'a jamais écrit le traité des mouvements humains auquel il rêvait, sa théorie lui a inspiré l'un de ses plus célèbres dessins. On pense à l'homme vitruvien, qui s'inscrit à la fois dans un cercle et dans un carré, les deux images étant superposées de manière cinétique pour exprimer l'analogie entre le cosmos et le microcosme qu'est le corps humain. *« L'homme est appelé par les Anciens microcosme, et ce nom est assurément bien donné car, de même que l'homme est fait de terre, d'eau et de feu, de même est fait le corps de la Terre ».*

Quand Léonard aborde la botanique et la géologie, c'est toujours avec l'idée d'y retrouver ses principes de mécanique universelle. En décrivant *« l'anatomie de l'homme et de la terre »* – c'est le titre de l'une de ses études – il insiste sur la circulation des liquides. L'eau est à la terre ce que le sang est à notre corps : le *« voiturier de la nature »* (*vetturale di natura*).

Le jaillissement de l'eau et son écoulement, son pouvoir d'érosion sont des thèmes constants de la pensée léonardienne. *« L'eau ronge les montagnes et comble les vallées ; si elle le pouvait, elle réduirait le monde à une sphère parfaite ».* Il n'y a pas, pour l'ingénieur, de plus grand défi que celui de la domestication des eaux.

C'est donc vers la maîtrise hydraulique que convergent à la fois la pratique courante de l'ingénieur Léonard, la pensée de « l'homme universel », voire les obsessions de l'homme tout court. Enfant, il avait connu l'Arno en crue et en avait gardé – si l'on en croit les descriptions et les dessins qu'il consacra toute sa vie au thème du déluge – un souvenir terrorisé.

On pourrait également démontrer combien l'idéal de circulation est consubstantiel à la pensée urbanistique de Léonard de Vinci. Lorsqu'il imagine, pour Ludovic le More, une ville de Milan *« libérée de sa muraille »*, c'est pour mieux l'intégrer au réseau étoilé des canaux et des cours d'eau qui font de la grande cité le cœur vivant de la Lombardie. Le même dispositif urbanistique et territorial est d'ailleurs proposé, quinze ans plus tard, à François 1er, pour faire de

Romorantin la nouvelle capitale du royaume. Si Léonard peut ainsi mettre sous les yeux de ses mécènes des rêves de « machines territoriales », il va de soi que dans sa pratique d'architecte – ou, plus précisément, de conseiller en architecture, car il ne fut jamais maître d'œuvre d'un chantier de construction – il reprend les mêmes principes mécaniques que pour toutes ses autres activités.

Dans l'Italie du *Quattrocento*, « machine » et « édifice » sont presque synonymes. La coupole de Brunelleschi est ainsi souvent décrite comme une machine, sa construction ayant pareillement nécessité un calcul des forces et des contraintes. Dans ces conditions, il n'est guère étonnant de voir Léonard de Vinci assumer la tradition de la métaphore anthropomorphique de l'architecture, énoncée par Alberti sur le modèle vitruvien, puis théorisée par l'architecte florentin Antonio Averlino, dit Filarete.

Consulté en 1487, par le conseil de Fabrique du Dôme de Milan, soucieux d'assurer la solidité de l'édifice inachevé, Léonard leur adresse une lettre. Il y détaille la pathologie d'un « *Dôme malade* », ayant besoin d'un « *médecin architecte* » pour rétablir « *l'harmonie des éléments* » qui définit la santé d'un organisme.

La terre et le corps, l'édifice et la machine : tout, chez Léonard, ramène à la notion d'organisme. L'ingénieur a pour charge de dégager les principes mécaniques de cette unité naturelle. Il doit décrire « *l'anatomie des machines* » qui forment le monde intelligible. Les écrire, ou plus précisément, les dessiner. Car, dans ses manuscrits, Léonard raille ceux qui prétendent écrire des traités de machines sans les représenter visuellement.

La Renaissance est véritablement le moment où le primat de la vision s'affirme avec éclat. « *L'homme sans lettre* » n'entend pas s'en laisser imposer par les écrivains. La poésie ? Ce n'est qu'une « *peinture aveugle* ». Et Léonard va plus loin encore lorsqu'il interpelle le lettré : « *O écrivain, à l'aide de quelles lettres décrirais-tu tout ce qui est représenté avec autant de perfection que le fait ici le dessin ?* »

Cette valorisation de la culture figurative a, là encore, une portée sociale. C'est parce qu'il est maître du dessin, et parce que le dessin a acquis, grâce à la perspective brunelleschienne, une dignité mathématique, que l'artiste est glorifié par la Renaissance italienne.

Prenant part à la querelle du système des arts qui occupe alors les esprits, Léonard ne manque pas de promouvoir la peinture, art de l'idéal, contre la sculpture, affrontement avec la matière. En tant qu'ingénieur, il doit pareillement s'affirmer comme un « *penseur dessinant* » – pour reprendre la formule de l'architecte Filarete. C'est à ce prix qu'il peut forcer le système de valeurs hérité de la période médiévale, qui oppose toujours les arts libéraux aux arts mécaniques. En mettant la perspective au service de l'art des machines, on le libère ainsi de sa souillure « *mécanique* ».

« *Il n'exerça pas une seule profession, mais toutes celles où entrait le dessin* ». Le propos de Giorgio Vasari, peintre et historien du XVIe siècle, n'a que l'apparence de la banalité. Il définit, en réalité, l'unité profonde de la démarche léonardienne. L'œil de Léonard perce les apparences. Son dessin révèle les principes mécaniques de l'univers. Par sa technique figurative, Léonard poursuit un projet global : celui de tout rendre visible. On peut discuter à l'infini pour savoir si, oui ou non, il est l'inventeur du roulement à billes. En revanche, il est un fait indiscutable : personne, avant lui, ne l'a jamais représenté de la sorte.

Dans sa méthode de cartographe, comme dans ses figurations anatomiques ou dans ses dessins de machine, Léonard de Vinci, armé d'une technique parfaitement maîtrisée de la perspective, définit la grammaire fondamentale du dessin technique : vues éclatées, schématisations géométriques, figurations sous plusieurs angles. Dans les commentaires de ses planches anatomiques, Léonard précise qu'il efface telle « *armature* » du corps pour mieux montrer quelques organes cachés. Ce même terme est repris quand il dessine un écorché de machines. Il utilise la même technique figurative que pour ses dissections. Si l'on veut à tout prix sauver la figure d'un Léonard inventeur, on peut retenir cette innovation : l'ingénieur florentin a mis au point une méthode globale de représentation de la réalité. Ce qui, avouons-le, n'est pas mince.

De ce fait, on retrouve l'idée même de Renaissance, dans son unité et dans son universalité. On doit au philosophe contemporain Paolo Rossi d'avoir montré combien les progrès des arts figuratifs et ceux de l'expérimentation scientifique avaient partie liée. Par son art du dessin, Léonard croit pouvoir dépasser la contradiction entre théorie et pratique, en concevant une méthode d'expérimentation purement figurative. « *Grâce à mon dessin, chaque détail et chaque ensemble te sera connu, comme si tu avais en main le membre lui-même et que tu le retournais sur tous les côtés* ». Léonard est avant tout ceci : l'inventeur de machines de pensée.

« *Devenir à la ressemblance du miroir* ». Telle est peut-être l'exigence la plus intime et la plus fondamentale de celui qui s'est rêvé homme universel. Léonard s'est voulu l'ingénieur de la machinerie du monde. Mais peut-on accéder à une représentation totale ? Il semble en avoir douté : « *Plût au créateur que j'eusse la faculté de montrer la nature des hommes et leurs mœurs comme j'en décris la figure* ». Confronté à l'opacité des passions humaines, l'ingénieur laisse alors ses instruments d'anatomiste des machines pour reprendre le pinceau. ■

MYTHOLOGIE



En ce début de XXe siècle, alors que les écrits techniques de Léonard viennent d'être redécouverts, les nouvelles inventions se multiplient : avion, bicyclette, automobile... Pour les ingénieurs, c'est l'occasion d'inscrire leurs machines dans une histoire d'origine. Ces machines, « *Léonard les avait prévues* ». Un mythe est né, qui va être dénoncé. Il n'en sera pas pour autant affaibli.

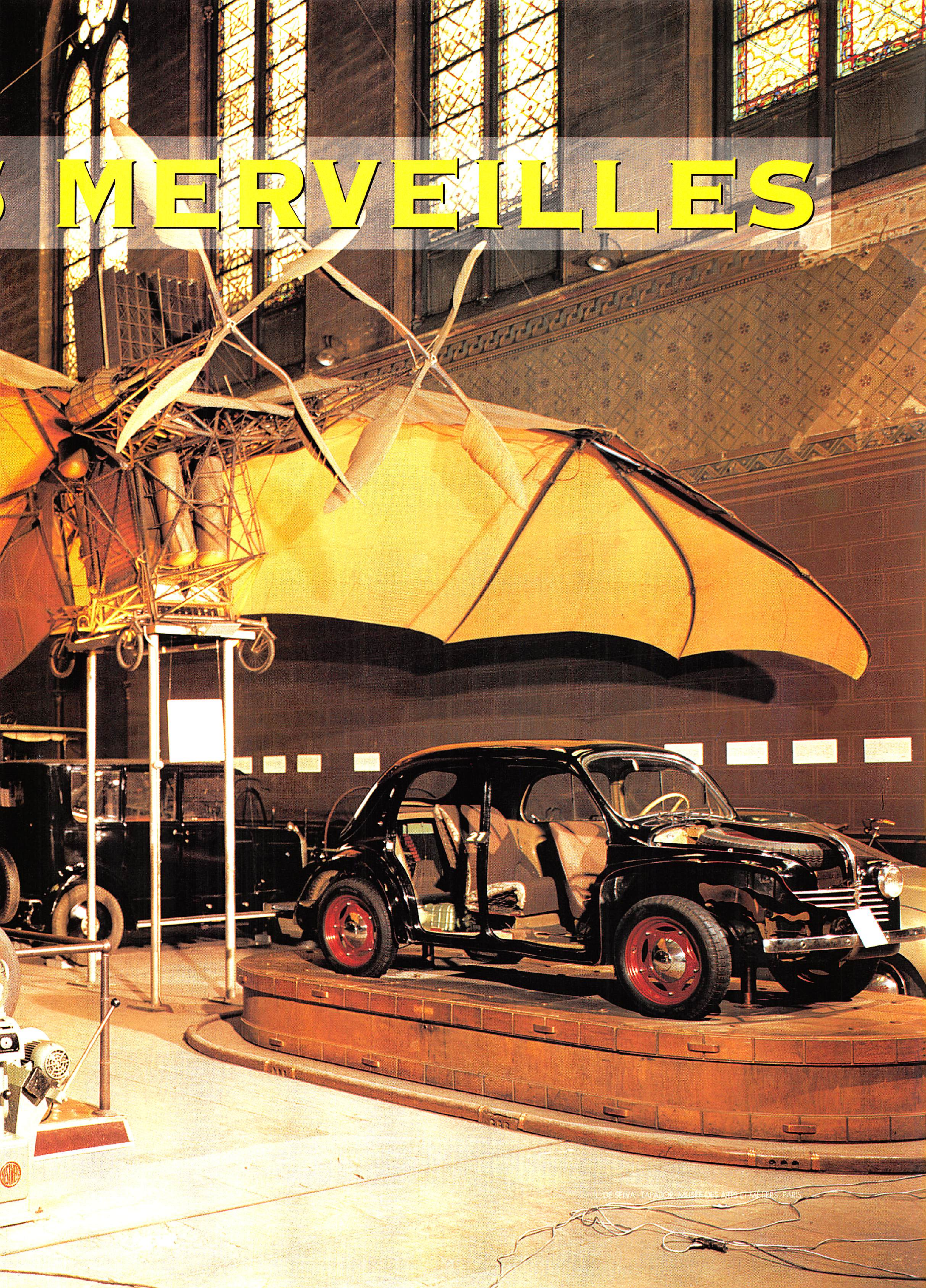
L. DE SELVA - TAPABOR

L'HOMME DES



Le 27 octobre 1902, Léonard est au cœur des débats de l'Académie des Sciences. Cet avion que Clément Ader vient de faire voler, ne l'avait-il pas prévu quatre siècles plus tôt ?

MERVEILLES



L. DE SELVA - TAPABOR - MUSÉE DES ARTS ET MÉTIERS - PARIS

Léonard, précurseur de la science moderne ? Ce n'est que fantaisie, illusion, erreur, s'indigne Marcellin Berthelot au début de ce siècle. Soixante ans plus tard, un historien des sciences reprend le flambeau avec d'infinies précautions. Pourquoi ?

PAR HÉLENE VÉRIN

En 1964, Bertrand Gille, autorité incontestée en France dans le domaine de l'histoire des ingénieurs, prenait et soutenait une position difficile : Léonard de Vinci n'est pas l'inventeur miraculeux, le précurseur incomparable que l'on a décrit. Son œuvre n'est pas l'acte de fondation de la méthode expérimentale et de la science moderne [1]. Il était un ingénieur. Ses carnets ? Travail d'ingénieur. Ils sont comparables à ceux que nous ont laissés ses contemporains ; la plupart des « inventions » de Léonard de Vinci s'y trouvent déjà. En adoptant ce point de vue, Bertrand Gille détournait ses lecteurs de la légende de Léonard, au profit d'un examen volontairement limité.

Le parti était malaisé. Les deux chapitres consacrés à Léonard de Vinci, dans *Les ingénieurs de la Renaissance,* sont tout empreints de ce malaise. Pour le surmonter, Bertrand Gille se réfère à une autorité : Marcellin Berthelot ; pour en signaler le bien-fondé, il nous rapporte une anecdote édifiante : *« A la fin d'octobre 1902, un historien, bien oublié aujourd'hui, présentait à l'Académie des Sciences un exposé sur Léonard de Vinci ingénieur et savant* [2]*. Il y portait aux nues le rôle de Léonard dans les progrès de la science et de la technique. Berthelot s'indigna : tout cela n'est que fantaisie, illusion et erreur ».*

« L'auteur qui rapportait cette dispute, poursuit Bertrand Gille, *ajoutait quelques années plus tard : "Cette opinion de Berthelot ne fit aucun bruit et n'ébranla aucunement, dans aucun domaine de sa renommée, le nom de Léonard de Vinci. Je vais donc suivre en toute tranquillité, au cours de mon exposé, la pensée en quelque sorte traditionnelle de tant de critiques et de savants". Notre étude,* conclut Bertrand Gille, *se voudrait l'écho tardif de l'opinion de Berthelot* [3] *».*

Fantaisie, illusion, erreur : Berthelot appliquait à l'article de M. A. Ronna, les catégories que la pensée positiviste applique traditionnellement au mythe. Quoi qu'il en ait dit, le mythe a poursuivi paisiblement son cours. C'est là l'un de ses traits principaux : chassez-le, il revient au galop. La raison positive ne peut rien contre le mythe qui ancre la logique de son discours dans d'autres nécessités, ou encore, qui ancre la nécessité de sa survivance dans une autre logique – c'est selon les mythologues. Faut-il donc admettre que Léonard, fondateur de la science moderne, est un mythe ?

En tout cas, lorsque quelque soixante années plus tard, Bertrand Gille reprend le flambeau de Berthelot, ce n'est pas sans réticences, ni d'infinies précautions : *« Cet essai sur les ingénieurs de la Renaissance eût paru singulièrement incomplet si nous n'avions, au moins, évoqué la figure du grand Florentin. Nous ne voudrions le faire qu'avec un extrême scrupule et dans la ligne la plus étroite de nos préoccupations ».*

Pourquoi ces embarras ? Pourquoi ce malaise ? Pourquoi Bertrand Gille veut-il nous faire croire que, depuis Marcellin Berthelot, un grand vide de l'esprit critique a laissé place au mythe de Léonard, jusqu'au tardif écho qu'il renvoie enfin dans son livre, ce qui est faux ?

Relativisons le procédé ; il est commun. On dirait que chaque auteur, parlant de Léonard doit, soit adhérer et contribuer au mythe en l'enrichissant d'une nouvelle variation, soit, le refusant, en bâtir un autre, moins compromettant à ses yeux.

Ces quelques remarques invitent à penser que Léonard de Vinci constitue un mythe puissant et d'une grande complexité. Tout mythe est un mythe fondateur : là-dessus, anthropologues, mythologues et philosophes s'accordent. Il contribue à assurer la cohésion sociale. Mais alors, quand et pourquoi est-il apparu ? Comment s'imposa-t-il ? Sous quelles formes ? Pour qui ? Et qu'en est-il parmi les savants et les ingénieurs ? Quel fut - s'il fut - leur mythe de Léonard ?

COMMENT FONCTIONNE LE MYTHE

Revenons à la colère de Berthelot, et poursuivons l'anecdote au-delà de ce que nous livre Bertrand Gille. Ce 27 octobre 1902, à la fin de la séance, la commission secrète, qui traitait de

1 – Ce que montrait en 1962 Paolo Rossi, faisant le bilan des recherches sur cette question dans *Les philosophes et les machines, 1400-1700*. Trad. fr. Paris 1996, p. 29

2 – Il s'agit de la séance du 27 octobre 1902. L'article présenté par Haton de la Goupillère est de M.A. Ronna : *Léonard de Vinci, peintre, ingénieur, hydraulicien.*

3 – Bertrand Gille, *Les ingénieurs de la Renaissance*, Paris, 1978, p. 148.

secrets militaires, se réunit et décida : *« La commission des aérostats (...) portera désormais le titre de "commission d'aéronautique" plus approprié à la nature des travaux qui sont soumis à son examen ».*

L'avion de Clément Ader avait volé en 1890. Dès 1874, Hureau de Villeneuve écrivait un article, *Léonard de Vinci aviateur*. En 1902, les académiciens le confirment, on commençait à prendre au sérieux ces engins volants plus lourds que l'air. La discussion sur les machines volantes de Léonard qui précéda cette décision la favorisa-t-elle, justement, ce jour-là ?

Retenons que c'est au moment où les ingénieurs multiplient les nouvelles inventions – l'avion, la bicyclette, l'automobile – que les manuscrits de Léonard sont transcrits, ses dessins reproduits et diffusés. Ces publications font voir, au temps même où les machines apparaissent, que *« Léonard les avait prévues »*. Plus tard, avec la guerre de 14-18, les premiers tanks, les mitrailleuses, moins les gaz asphyxiants, mais tous aux justes avantages d'une guerre défensive, seront l'occasion de nouveaux émerveillements devant le génie de Léonard.

Cette coïncidence dans le temps, jointe à la méconnaissance des travaux des autres ingénieurs de son époque et à l'extraordinaire pouvoir évocateur des dessins de Léonard, tout cela suffit-il pour justifier l'emballement des esprits ? Simple « erreur » ? Une erreur dénoncée, on l'examine, on la juge, on la corrige. Un mythe dénoncé, il est reconnu, il n'est pas annulé. Il nous faut donc admettre que, dans le dernier quart du XIXe siècle, la science positiviste et son application par des ingénieurs dans un machinisme si brusquement accru, exigeaient un mythe fondateur.

Faisons un point historique. En France, dès 1797, Venturi affirme que les carnets de Léonard, dont il présente quelques extraits, sont « *les écrits d'un homme qui, à la renaissance des Lettres, a été un des premiers à s'élancer dans la carrière des sciences exactes* ». Quelques décennies plus tard, en 1840, Libri le réaffirme dans son *Histoire des mathématiques en Italie*. En 1841, Delécluze s'étonne que Léonard savant n'ait pas fait l'objet d'études entre ces deux dates. Et il confirme : Léonard était avant tout un savant. Enfin, en 1860, au nom de l'histoire, Charles Clément dénonce « *le roman de Léonard que des admirations et des dénigrements sans mesure ont souvent dénaturé* ». Il s'agit de Léonard l'artiste, le peintre, qui connut de tels excès depuis le XVIe siècle. Selon Clément, il doit être placé parmi les héros : « *Les représentants et les promoteurs d'une civilisation tout entière* ».



L. DE SELVA - TAPABOR, ARCHIVES DE LA BIBLIOTHÈQUE DE POLYTECHNIQUE

En positiviste convaincu, le chimiste Marcellin Berthelot défend le principe selon lequel la science moderne se passe de mythe fondateur. Exit Léonard.

Dans les années soixante-dix, Léonard devient le héros de la civilisation moderne et de son machinisme. Relevons trois traits propres aux mythes fondateurs. Ils révèlent le temps d'avant le temps ; comme vérité du temps. Léonard « *était comparable à un être qui s'était éveillé trop tôt dans les ténèbres, tandis que tous les autres dormaient encore* » ; « *un génie tout moderne à une distance infinie de son temps* ». Ils témoignent, par ailleurs, d'une unité cachée dans la multiplicité de ce qui se donne à voir, sur le mode du divisé, du séparé, du particulier, du singulier. « *Au regard de nos habitudes, Léonard paraît une sorte de monstre, un centaure ou une chimère, à cause de l'espèce d'ambiguïté qu'il représente à des esprits trop exercés à diviser notre nature* ». Enfin, ils dévoilent et dissimulent dans des symboles à déchiffrer, l'ambiguïté du tout primordial, introuvable et partout présent. De Léonard comme de son œuvre, « *on peut seulement pressentir les contours sans jamais trouver les limites* », il « *confond et multiplie, par un singulier mélange, la beauté des deux sexes* ». Un article vient de paraître en Italie sur « Léonard androgyne ». A ces citations, on pourrait en substituer des milliers d'autres, semblables.

Si l'on se tourne vers une interprétation fonctionnaliste des mythes, on apprend qu'ils justifient, renforcent et codifient les croyances et les pratiques propres à l'organisation d'une société ; alors, d'autres questions surgissent.

Dans la société moderne, si complexe et diversement contrastée, où les catégories sociales se distinguent au nom des valeurs qu'elles défendent, un mythe fondateur doit pouvoir don-

ner lieu à des interprétations très variées. La figure de Léonard, multiforme et multivoque, devient le prétexte, pour chaque groupe, de défendre les valeurs qui le soudent, contre celles des autres. Une lutte s'engage alors, qui a pour enjeu le contenu du mythe de Léonard.

Ainsi, pour revenir à l'anecdote du 27 octobre 1902, lorsque Marcellin Berthelot entre en colère contre le mythe de Léonard, précurseur de la science et de la technique modernes, ne va-t-il pas à l'encontre des convictions des savants et des critiques qui se servent de leur mythe de Léonard pour défendre leur vision scientifique du monde ? Contre lesquelles ? Impossible de comprendre ce qui est en jeu, dans cette figure de Léonard, savant et ingénieur, sans faire une incursion dans les autres variantes mythiques.

Les errements du mythe de Léonard

« *Léonard, symbole d'une civilisation, d'un univers ou de n'importe quoi* ». Désabusé, Cioran résume bien : Léonard, dont la devise était « *une obstinée rigueur* », est devenu le symbole de n'importe quoi. La moindre investigation dans les écrits, pléthoriques, qui lui sont consacrés, est désolante. La figure de Léonard est encombrée d'oripeaux.

Ce ne sont cependant pas n'importe quels oripeaux. Pour en donner une idée, je me bornerai à un moment, celui du début des années 1910, et à deux exemples extrêmes : un savant et académicien scrupuleux, Pierre Duhem, et un mage mondain et impétueux (il se faisait appeler *Sâr*), Péladan. La guerre approche, on resserre les rangs, les nationalismes s'échauffent.

Pierre Duhem préface le troisième volume de ses études sur Léonard [(4)]. Contre la thèse d'un Léonard fondateur de la science moderne, il prouve qu'il n'était qu'un héritier de ses véritables fondateurs, les scolastiques de l'université parisienne. Voilà deux légendes évincées d'un coup : Léonard précurseur, et l'obscurité de la scolastique médiévale, et ceci, au profit d'une vérité prouvée. Mais ce qui peut faire douter de cette « vérité » et soupçonner le mythe qui s'y introduit, c'est le dernier paragraphe de sa préface de 1913 : Léonard de Vinci, écrit-il, est « *à sa place parmi les précurseurs parisiens de la physique moderne* ».



Léonard est l'héritier des scolastiques de l'université parisienne, affirme l'académicien Pierre Duhem, *« Comment un Parisien n'en serait-il pas fier ? »*

ROGER-VIOLLET

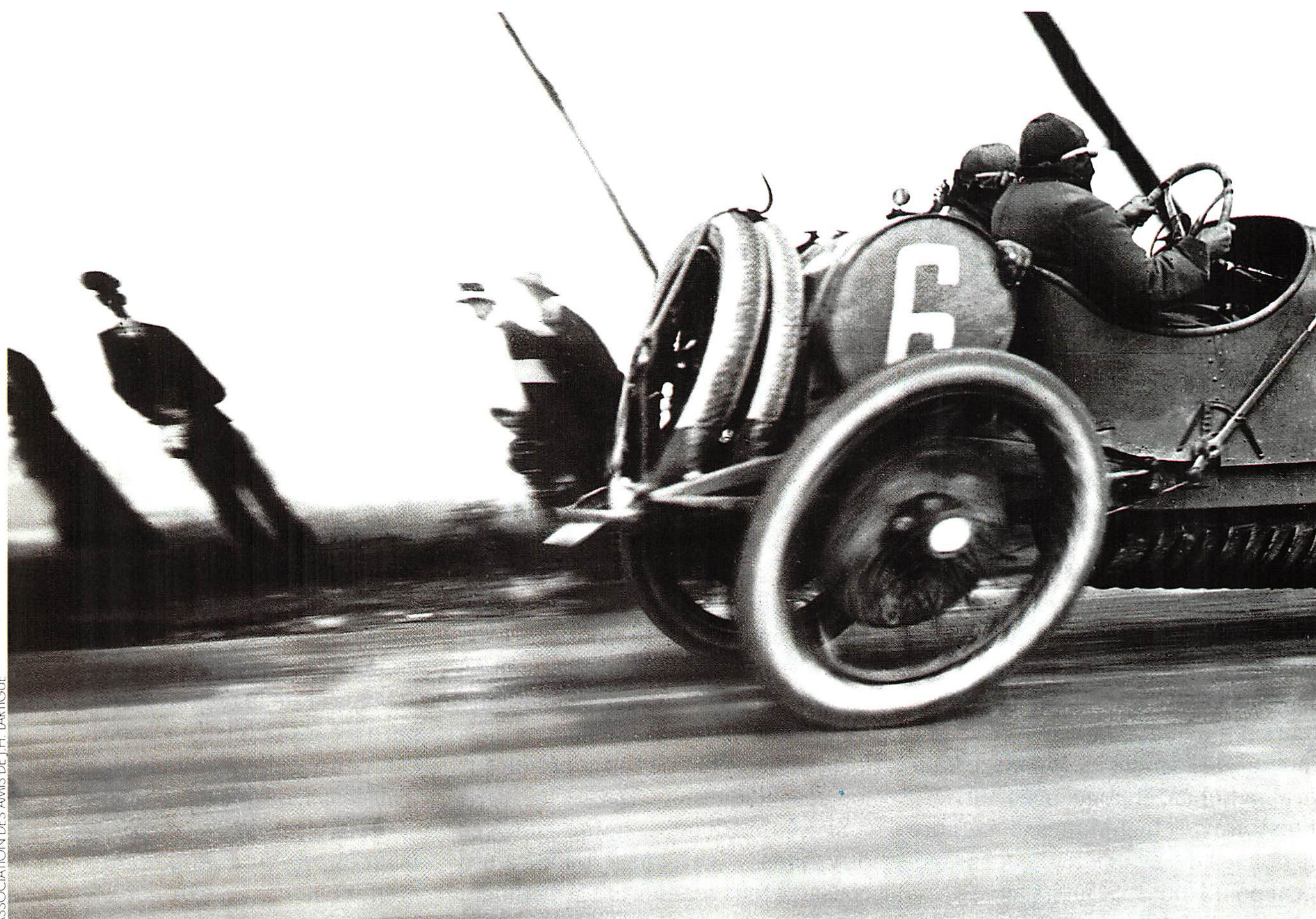
Reconnaître la valeur scientifique de Léonard sert – en réalité – le nationalisme français : « *Comment un Parisien n'en serait-il pas fier ? Comment un Français n'en éprouverait-il pas un légitime orgueil ?* » En outre, l'université parisienne étant « *la véritable gardienne de l'orthodoxie catholique, comment un chrétien n'en rendrait-il pas grâce à Dieu ?* » Avec cette dernière remarque, nous ne sommes pas sortis du nationalisme. Et Péladan va le confirmer.

En 1910, tout aussi français et catholique que Duhem, Péladan, auteur fort à la mode, publie *La philosophie de Léonard de Vinci*. Son propos est clair, la défense de Léonard est une œuvre militante : « *L'originalité de Léonard ne peut s'établir qu'aux dépens de Luther* ». Luther, représentant de la Réforme qui « *n'a été qu'un soulèvement de races avides de prendre leur place et même celle des autres, au grand soleil du fait* ». Comprenons bien : il faut défendre Léonard, symbole du génie gréco-romain, qui est, cela s'entend, catholique, contre « *la race aryenne occidentale* », ces Allemands, qui occupent l'Alsace-Lorraine depuis 1870.

Il ne faut pas croire qu'en ces années où s'annonce la guerre, vincianisme et anti-vincianisme servirent les seules couleurs de la France. En Russie, celui-ci alimente l'anti-occidentalisme religieux, voire mystique. Léonard symbolise l'occident égaré, éloigné de Dieu, sans repentir et prisonnier du « je sais » humain [(5)]. En Italie, Croce dénonce « *l'inconsistance spirituelle* » de Léonard, au nom de la conscience de l'Esprit ; Roberto Longhi engage un réquisitoire « *contre cet*

4 – Pierre Duhem, *Etudes sur Léonard de Vinci. Les précurseurs parisiens de Galilée*. Réimpression, Paris, 1984. La préface est datée du 24 mai 1913.

5 – Père Paul Florensky, *La Colonne et le Fondement de la Vérité*. Trad. Constantin Andronikof. Edit. Age d'homme, 1994.



ASSOCIATION DES AMIS DE J.H. LARTIGUE

homme (Léonard) qui, en une période de culture empirique, nous procura l'illusion béate du génie universel et qui maintenant nous donne l'impression d'être un précurseur de Larousse ».

Derrière ces dénonciations, celle de la technique et du machinisme, destructeurs de l'esprit, divisant l'homme : ces avatars du mythe de Léonard, nous apprennent déjà quelles tourmentes idéologiques agitent l'Europe à la veille de la Première Guerre mondiale.

Ces violents partis pris s'exacerbaient toutefois sur le fond d'un héritage : le décadentisme des dernières décennies du XIXe, s'était complu dans l'image d'un Léonard, symbole d'une époque ambiguë, décadente, voluptueuse. Léonard, ce « *Faust italien* » – on reprend indéfiniment le mot de Michelet, est le mage androgyne de ce temps d'avant le temps, celui de la confusion des sexes et des savoirs. Nouvelle incarnation d'Hermès Trismégiste, « *il se perd dans les rêveries et dans les recherches de décadence et d'immortalité* », écrit Taine. Est-il réincarnation divine ou antéchrist ? (6)

Au début de ce siècle, les écrits de Léonard, tout juste redécouverts, permettent aux ingénieurs d'inscrire leurs machines dans une histoire d'origine : la tendance naturelle de l'esprit humain n'est-elle pas de chercher le progrès technique ?

C'est Léonard le peintre, l'artiste, le philosophe, le savant ésotérique qui est au centre de ce mythe-là, et ce sont des essayistes, littérateurs, critiques d'art, qui le répandent. On ne s'étonnera donc pas d'y découvrir un thème majeur : l'individu d'exception. Léonard devient l'occasion du déploiement d'un narcissisme dont l'aveu même devient une élégance : Maurice Barrès y excelle. Léonard est pour lui un « *traitement de psychothérapie* » (7) qui consiste à appliquer à « *certaines particularités de l'âme moderne* » une méthode : « *l'exaltation du moi* ».

LÉONARD, MYTHE FONDATEUR POUR LES INGÉNIEURS ?

Le mythe de Léonard nous apprend d'abord la puissance de l'esprit mythique. On a besoin de ce mythe fondateur. Il répond, par sa forme et par ses contenus, à des questions qui demeurent des apories. D'où la colère de Berthelot s'élevant contre l'« *irrationnel* » au nom du « *rationnel* ». En

6 – Dimitri Merejkowsky, *Le roman de Léonard de Vinci, La résurrection des dieux*. Trad. fr. Dumesnil de Grammont, Paris, s.d. L'ouvrage eut un grand succès partout en Europe.
7 – Maurice Barrès, *Trois stations de psychothérapie*, Paris, 1891, p. 3.

positiviste convaincu, il défend le principe selon lequel la science moderne n'a pas besoin de mythe fondateur. Comme les mathématiques, *« qui se tiennent toutes seules »* – on le répète depuis l'Antiquité – elle n'a d'autres fondements que la maîtrise technique de ses démonstrations.

En outre, Berthelot sait très bien, incontestable savant qu'il est, que la science moderne, celle qu'il pratique, a des exigences d'analyse et de formalisation qui n'ont pas grand-chose à voir, techniquement, avec les raisonnements de Léonard, si perspicace et soucieux de théoriser qu'il soit. De même, pour un positiviste, celui qui se doit d'appliquer la science à la technique et donc répandre l'esprit scientifique jusque dans les artifices qu'il construit, c'est-à-dire l'ingénieur, n'a pas à se compromettre avec des faiseurs d'illusions. Or, il se trouve que l'auteur de l'article incriminé ce jour-là, M.A. Ronna, était un ingénieur, féru d'histoire des techniques et membre du conseil de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale.

Ce dernier trait est important, si l'on veut comprendre le parti pris de Ronna (notons que son article est loin d'être méprisable) : le mythe de Léonard, génie universel, inventeur des machines qui se multiplient alors, sert le principe d'un devoir-être technique du pouvoir de l'esprit humain. Le progrès de l'humanité ne pouvait être que le progrès des sciences et des techniques appliquées à l'industrie. Léonard ingénieur et savant prouve cette nécessité. Ceci, Ronna se donne pour tâche de le défendre. Contre qui ? Fort heureusement, il nous le dit : *« Avec Léonard, la renommée du peintre a tué la gloire de l'ingénieur ; il convient de rétablir la balance »*.

Dans ce vieux débat, celui de l'artiste contre l'ingénieur, Ronna défend sa profession, ses valeurs. Mais son propos va plus loin. C'est l'universalité de Léonard, harmonieux et équilibré, qui est rétablie : contre *« le Faust italien »*, *« le Gœthe italien »*. Rappelons ce que Valéry dit de Léonard. Dans une société où règne, sous tous ses aspects, la division du savoir, du travail, Léonard sert de référent idéal : lui qui fut *« le précurseur de Taylor »*, il était un génie universel.

Ses détracteurs ne manqueront pas de rappeler qu'il avait la particularité de ne pas terminer ce qu'il avait commencé. Ce seul trait, avéré par ses contemporains, a donné lieu à des interprétations multiples. Tenons-nous au seul Léonard ingénieur et savant. C'est d'abord un Léonard peu soucieux de gloire et dégagé de tout esprit courtisan. Un Léonard désintéressé, se vouant de plus en plus au perfectionnement de la science et de ses applications. Dans la société moderne, c'est un principe essentiel que le savant ou l'ingénieur ne tienne pas sa légitimité de sa soumission aux injonctions de la loi politique, mais de son adhésion aux lois scientifiques.

Si Léonard ne termine pas ses ouvrages, c'est aussi parce qu'il consacre tous ses efforts à la méthode : or, c'est la méthode qui définit la science. Sa maîtrise seule assure la reproduction des expériences et la validation des résultats. Les carnets de Léonard, en outre, témoignent de ses efforts pour produire une méthode de conception et d'invention. *« On est là en présence d'une valeur humaine ; c'est l'esprit qui marque une action nouvelle, non seulement sur les choses, mais sur la pensée »*.

Léonard a une seule maîtresse, affirme-t-il, l'expérience. Il prend le temps de faire. Et il prend aussi le temps de recommencer toujours, inlassablement. *« L'homme le plus implacablement curieux de l'histoire »* connaît, selon la terminologie d'usage, *« la puissance des faits »*. Paradoxalement, l'inachèvement est chez lui la preuve de la perspicacité de son analyse des effets. Les machines qu'il concevait devaient, pour être réalisées, nécessiter une maîtrise des matériaux qui n'existait pas à l'époque.

Ces machines, réalisées en petit d'après ses dessins, aujourd'hui, nous enchantent. Peu de leurs admirateurs savent que ceux qui les ont construites *« ont eu parfois la surprise de découvrir de curieuses erreurs dans le dessin : une roue de trop et un engrenage supplémentaire »*. Le surplus inutile tient à l'inachèvement. Qu'à cela ne tienne, ils sont *« si parfaitement* [(8)] *inutiles qu'on s'est demandé si Léonard n'introduisait pas sciemment ces anomalies pour décourager plagiats et pillages »*.

Quoi qu'il en soit, depuis quelques décennies, Léonard est devenu le symbole de la puissance du virtuel. Le thème est aujourd'hui trop présent pour qu'il soit besoin d'insister. Il se combine à deux autres thèmes en vogue : Léonard précurseur de l'art-science et de la techno-science. Léonard a cessé d'être un positiviste. Il est, par excellence l'Ingénieur, doué d'*ingenium*, de pouvoir de synthèse.

« Lis-moi attentivement, ô lecteur, si tu trouves plaisir à mon œuvre, car le métier que j'exerce trouve bien rarement accès auprès du monde et la persévérance nécessaire à qui veut poursuivre de telles recherches et réinventer toutes choses n'existe que chez peu de gens. Et venez, hommes, venez voir les merveilles que l'on peut découvrir grâce à de telles études » [(9)].

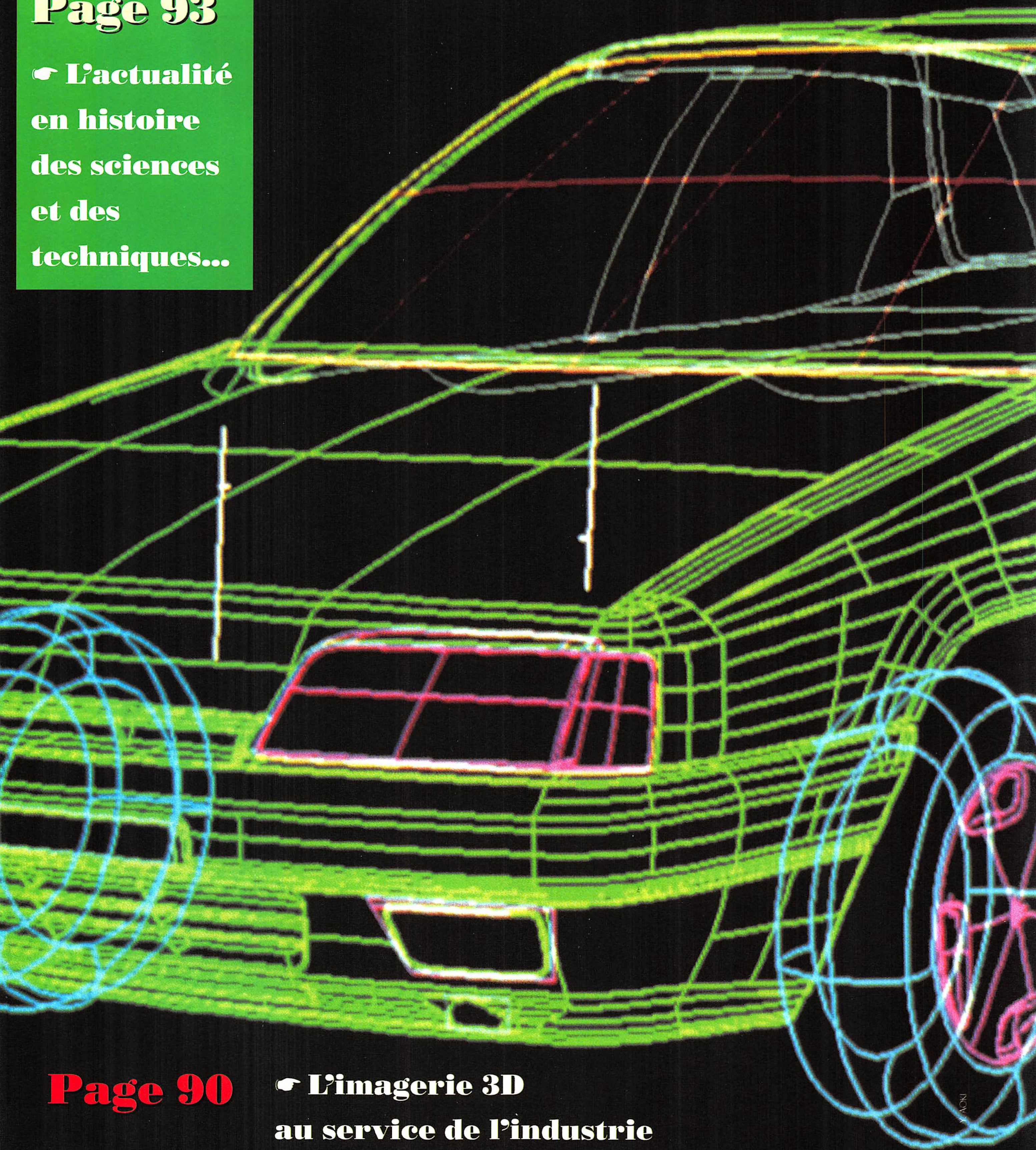
Par ces mots du *Codex Madrid I*, redécouvert en 1965, Léonard, ébauchant probablement son traité des *Éléments des Machines,* nous invite. Prenons donc le temps d'étudier comment il compose et dessine une seule de ses machines. Peut-être cela suffira-t-il à nous faire admettre la puissance du mythe de Léonard. *« Dans toute œuvre de génie, nous reconnaissons nos propres pensées répudiées : elles reviennent à nous avec une certaine majesté dépaysée »*, écrit Nietzsche. Léonard égare et reconduit. Le sourire de Mona Lisa est inachevé. ■

8 – Souligné ici par l'auteur de l'article.
9 – Léonard de Vinci, *Codex Madrid I, 6r.*

Enquêtes et actualité

Page 93

☛ L'actualité en histoire des sciences et des techniques...



Page 90

☛ L'imagerie 3D au service de l'industrie

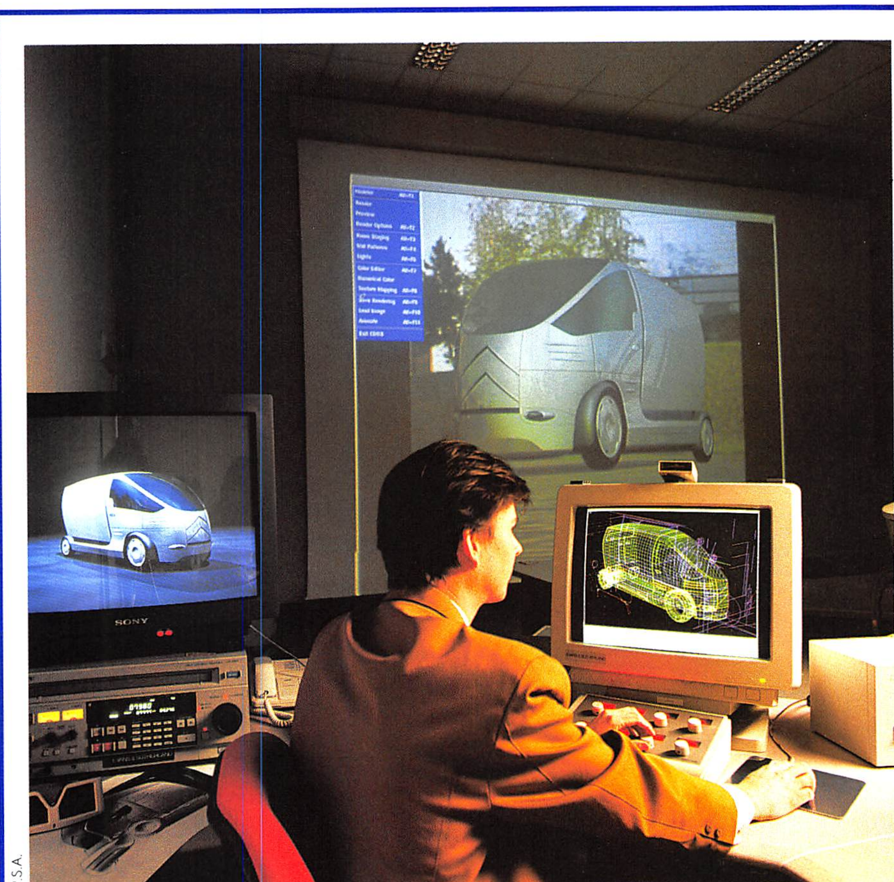
LA PERSPECTIVE

L'image tridimensionnelle, baptisée 3D, a envahi nos écrans. C'est peu de le dire. Mais encore convient-il de ne pas se tromper. Qu'est-ce que la 3D ? Certainement pas une image bidimensionnelle. Encore que... les logiciels d'illustration réputés travailler en deux dimensions permettent, pour des objets simples (logos, titres, etc.), de fabriquer des effets de profondeur et de mise en perspective. Celle-ci utilise toutes les techniques de la peinture classique. On peut ainsi placer un objet dans un plan et en modifier la perspective selon le déplacement de l'angle de vision de l'observateur. On peut aussi, pour générer un effet de profondeur, jouer sur la gestion d'une source de lumière ou l'intégration d'un dégradé sur le relief.

Quoiqu'il en soit, l'imagerie tridimensionnelle véritable est beaucoup plus riche en potentialités. Elle nécessite, pour sa réalisation, la mise en œuvre de divers modèles. Nous allons les détailler.

Pour dessiner un objet en 3D, on peut d'abord utiliser des primitives graphiques. Il s'agit de volumes (cube, sphère, cône, cylindre, etc.) que l'on peut assembler, en réduisant ou en augmentant leurs dimensions. Le dessinateur peut aussi définir son objet en s'appuyant sur un maillage de polygones. Il en modifie la surface en tirant ou en poussant intuitivement les nœuds. Le résultat reflète le plus souvent cette démarche approximative.

L'imagerie en trois dimensions concerne particulièrement les concepteurs de jeu vidéo. Les objets qu'ils utilisent, créés selon les méthodes précédemment citées, sont habillés de textures. Celles-ci sont obtenues par numérisation de photographies. Elles sont ensuite découpées en polygones élémentaires afin de recouvrir la totalité des objets créés. L'éclairage vient compléter la scène parcourue par le joueur. Enfin, l'ordinateur calcule les



P.S.A.

Grâce aux images 3D, les ingénieurs définissent des carrosseries à l'aide d'un maillage de polygones. Celui-ci permet d'obtenir directement les caractéristiques aérodynamiques du véhicule et les cotes nécessaires à sa construction.

On peut dire de Léonard qu'il inventa le dessin technique. Aujourd'hui, les ingénieurs produisent des images 3D sur des ordinateurs. Comme celles de Léonard, ces images reposent sur l'analyse mathématique de la forme des objets.

PAR J.L. PROMÉ

ÉLECTRONIQUE

vues des objets, image par image, selon le déplacement de l'observateur. Celui-ci doit être suffisamment rapide pour générer des sons et suivre le scénario du jeu, tout en produisant une animation fluide de la scène. Le réalisme du jeu dépend à la fois de cette fluidité, de la pertinence et du déroulement des scènes. Le concours simultané de ces facteurs limite parfois la qualité du rendu.

Si l'on souhaite produire une image plus précise, le recours aux modèles mathématiques s'impose. Ils sont surfaciques ou volumiques. Les premiers définissent des surfaces complexes en trois dimensions. Les seconds créent directement des volumes pleins. Tous deux nécessitent une analyse mathématique préalable des objets à créer. Des dimensions précises, calculées ou répondant à un plan général, peuvent ainsi être respectées.

Ces modèles permettent en outre d'attribuer des propriétés physiques aux objets concernés. Les paramètres de densité, de résistance à la chaleur, de dureté, etc. seront ainsi intégrés dans le modèle. Ceci permettra, dans une phase ultérieure, d'affiner sur écran l'analyse du comportement de l'objet étudié.

Nombreux sont ceux qui recourent à l'imagerie tridimensionnelle. Ainsi, grâce à elle, les aérodynamiciens visualisent parfaitement les tensions et la chaleur générées par l'écoulement de l'air sur les différentes parties d'un objet, en fonction des matériaux qui le composent. D'une façon plus générale, tous les concepteurs d'objets, pièces, équipements, ou systèmes sont concernés par la 3D : celle-ci permet notamment de définir les formes, les dimensions et les matériaux d'une pièce de base. Parallèlement, elle en facilite sa fabrication au moyen de machines-outils pilotées numériquement.

Le logiciel CATIA, mis au point par Dassault Industrie, en est un brillant exemple. Il permet de concevoir les éléments d'un avion en tenant compte de tous les paramètres aérodynamiques et de résistance des matériaux. Ses données commandent la découpe des pièces de l'avion, de même que l'extrusion de certains éléments en résine. Les objets obtenus par ce dernier procédé sont utilisés comme moules de fonderie. Des pièces de métaux rares ou précieux sont ainsi obtenues presque sans usinage.

La visualisation en 3D est également employée en recherche fondamentale. En chimie, moyennant l'utilisation d'une panoplie de logiciels et de banques de données sur les caractéristiques de milliers de molécules, on peut construire et visualiser, quasi instantanément, des molécules complexes parfois inédites. Ceci facilite leur étude, leurs propriétés chimiques découlant en partie de leur structure spatiale. Watson et Crick n'ont-ils pas découvert la double hélice de l'ADN en manipulant des modèles de bois et de plastique ? Bien plus souples, leurs équivalents en images électroniques ont permis de considérables progrès en pharmacologie.

Les mathématiciens, eux aussi, utilisent parfois l'imagerie 3D pour visualiser des familles de courbes, des opérations de topologie... De fait, les images obtenues ne peuvent pas servir de base à une démonstration. Mais elles permettent sans doute de faire progresser une intuition... Ce que les puristes estiment nuisible!

Ces mêmes mathématiciens produisent leur part d'algorithmes, utilisables par les ordinateurs, pour accélérer les traitements graphiques de l'imagerie 3D. Moyennant quoi, celle-ci a atteint sa pleine maturité. Les progrès de l'informatique aidant, elle peut aujourd'hui servir de base pour des systèmes « très interactifs ». Ceux-ci visent à produire des mondes virtuels.

Prolongement de la classique simulation, la réalité virtuelle se caractérise par l'immersion de l'utilisateur dans un monde créé de toutes pièces, qui interagit avec ses gestes, ses mouvements, voire ses intentions. L'ordinateur doit alors travailler en temps réel pour générer des réponses immédiates. Cela s'avère d'autant plus compliqué que cet univers virtuel doit être à la fois sonore, visuel, même tactile. Il doit tenir compte des propriétés physiques réelles ou imaginaires des objets virtuels, tout en gérant les actes de l'utilisateur et leurs conséquences.

La réalité virtuelle peut n'être que partielle. Cette distinction s'applique aux mondes virtuels qui ne permettent pas à l'utilisateur d'interférer avec son contenu. Dans ce cas, le sujet est généralement isolé de son environnement réel. Coiffé d'un casque de visualisation à grand angle, qui lui apporte son et image « stéréo », il se contente d'entrer dans le monde virtuel et de l'observer. Les mouvements de sa tête, interprétés en temps réel, lui permettent de s'y déplacer.

Les applications professionnelles de cette réalité virtuelle partielle se développent. Des agences immobilières pourraient ainsi offrir aux acquéreurs potentiels les moyens de visiter des appartements sans se déplacer. Les décorateurs seraient à même de proposer une visualisation dynamique d'aménagements intérieurs.

De fait, la réalité virtuelle partielle a déjà fait son entrée dans nos postes de télévision. En effet, le système Epsis, développé par une filiale de Matra Hachette, permet désormais de modifier les images diffusées par l'incrustation en temps réel d'une image numérique. Les panneaux publicitaires des manifestations sportives peuvent ainsi être adaptés à la législation des pays de retransmission, et même au goût des téléspectateurs.

Autre piste extrêmement prometteuse : l'aide à la conception ergono-

mique de systèmes complexes. L'institut néerlandais de recherche sur les facteurs humains contribue ainsi à la conception de la passerelle des futures frégates antiaériennes LCF bataves(1). Il s'agit, grâce au recours à la réalité virtuelle, de se soustraire à la lourde et coûteuse nécessité de réaliser une maquette échelle 1 de la passerelle, du centre opérationnel tactique ou même des locaux machines d'un navire de combat. On peut ainsi repérer immédiatement les problèmes d'aménagement de l'espace (par exemple, les obstacles à la visibilité), et les corriger d'autant plus facilement que tout cela n'est que virtuel. L'institut a prévu de mêler des éléments réels au monde virtuel ainsi créé, afin de le rendre plus crédible : l'utilisateur de la passerelle virtuelle pourra par exemple voir ses propres mains.

La réalité virtuelle séduit aussi les constructeurs d'automobiles. Peugeot tente ainsi de mettre au point un équipement qui permettrait à ses pilotes de faire leurs essais sur des véhicules totalement virtuels. Assis dans une cabine de voiture, le conducteur se déplace virtuellement sur les différents espaces routiers qui lui sont proposés sur un grand écran. Rien de bien nouveau à première vue. Pourtant, cette fois, l'ordinateur a totalement mémorisé les caractéristiques et performances de chacun des sous-ensembles censés avoir été montés sur ce véhicule virtuel (freinage, suspension...). Ceci permet de restituer au conducteur des sensations de pilotage (direction, tenue de route, freinage, accélération, etc.) en rapport avec la vitesse du véhicule, ses mouvements...

Ce type de simulation se rapproche d'une réalité virtuelle totale. Dans ce cas, le sujet peut agir sur l'environnement qu'il perçoit. Des capteurs intégrés à un gant lui permettent de « saisir » et de « déplacer » des objets virtuels. D'autres équipements génèrent, à l'intérieur du gant, des effets sensoriels tactiles et des retours d'effort correspondant aux préhensions réalisées. Ces techniques n'en sont toutefois qu'à leurs balbutiements. La qualité des images et des effets sensoriels, de même que le traitement en temps réel des mouvements, sont encore loin d'être parfaits. En outre, leurs concepts et domaines d'utilisation restent plus ou moins à définir.

Nombre d'applications commencent cependant à voir le jour. Elles concernent le plus souvent des activités réputées difficiles, ou coûteuses. Le chirurgien peut ainsi s'entraîner de façon particulièrement réaliste à la pratique d'une opération délicate : les caractéristiques spécifiques du patient à opérer sont prises en compte, tout comme celles de chaque organe.

Le domaine des loisirs devrait voir s'épanouir la réalité virtuelle totale. C'est l'application « phare » pour un public averti. Un petit nombre de jeux électroniques flirtant avec la réalité virtuelle totale existent déjà. Et les avancées technologiques récentes laissent augurer de jeux grâce auxquels l'utilisateur pourrait pratiquer tennis ou basket sans toucher la moindre balle. Grâce aux retours tactiles procurés par le gant, le joueur a la sensation de manipuler l'objet virtuel. Son impression est confirmée lorsqu'il entend et voit les effets de ses gestes réels dans la scène virtuelle. Leur ampleur est détectée par un senseur (par exemple, une caméra) qui, en temps réel, retourne l'information à l'ordinateur gérant le jeu.

Juste retour des choses, les militaires, de leur côté, entendent employer de plus en plus la réalité virtuelle pour pallier ou enrichir le réel. La technique de la survision permet déjà d'intégrer l'affichage de données sur les visuels de casques de pilotes d'aéronefs ou de véhicules. On peut imaginer que l'ordinateur soit capable d'afficher un choix d'actions en fonction d'une situation, ou encore des gestes à effectuer.

La réalité virtuelle devrait aussi permettre des préparations de mission de plus en plus réalistes. Grâce aux données emmagasinées, l'ordinateur pourrait en effet générer une représentation réaliste des lieux et menaces dans lesquels le militaire se trouvera réellement plongé. Une représentation interactive lui permettrait donc de s'entraîner efficacement et surtout, de réduire les risques de pertes. Cette technique pourrait également être mise à profit par les agents du GIGN lors de prises d'otages, etc.

Le champ de bataille devenant de plus en plus dangereux pour les yeux humains, du fait de l'usage intensif de laser (télémètres, désignateurs de cibles...), certains imaginent, pour le moyen terme, des aéronefs dont la verrière serait totalement protégée des rayonnements laser. Elle serait opaque aux yeux du pilote. Les différents senseurs équipant l'appareil seraient couplés à des moyens de navigation extrêmement précis et à des données emmagasinées dans la bibliothèque de l'ordinateur de bord, ou à celles d'un centre au sol, par l'intermédiaire d'une liaison à haut débit. Ce système fournirait une visualisation parfaite du monde extérieur sur toute la face interne du cockpit. Plus que parfaite, même, puisque les obstacles que constituent les nuages ou l'obscurité pourraient en être absents ou atténués. Des informations sur les défenses sol/air pourraient enrichir l'image en s'y incrustant.

Il s'agit encore de science-fiction. Mais la fiction tend ici à s'estomper rapidement... la réalité virtuelle servirait à visualiser la réalité vraie. Certes, les puissances de calcul requises sont de plus en plus considérables. Mais les évolutions rapides de l'informatique devraient être capables d'assumer ces nouvelles exigences. ■

1 - Leur entrée en service est prévue pour 2001.

ACTUALITÉ
DE L'HISTOIRE DES SCIENCES ET DES TECHNIQUES

Le centenaire de la radioactivité

Le 23 janvier 1996, les commémorations du centième anniversaire de la découverte de la radioactivité ont officiellement débuté. Sous le patronage d'un haut Comité National pour le Centenaire de la découverte de la radioactivité, présidé par Georges Charpak et Maurice Tubiana, ces cérémonies dureront trois ans. Ceci afin de couvrir la période allant de la découverte de Henri Becquerel, en 1896, à celles des Curie, en 1898.

Le 2 mars 1896, Henri Becquerel s'adresse à l'Académie des Sciences de Paris : grâce à la méthode photographique, il a observé un nouveau rayonnement émis spontanément par l'uranium. Il parle de « rayons uraniques ». Installé dans son laboratoire du Muséum, Becquerel poursuit ses recherches afin d'en préciser les propriétés. A ce moment, soupçonne-t-il la réelle importance de ses travaux ? Toujours est-il que sa découverte n'éveille guère les passions. En effet, les deux années suivantes pêchent par le peu de recherches effectuées sur le sujet. A contrario, les études menées sur les rayons X, découverts en 1895 par Röntgen, abondent. Signe d'un découragement ? En 1897, Becquerel lui-même abandonne ses travaux au profit de l'étude de l'effet Zeeman (il s'agit de la décomposition des raies d'un spectre lumineux sous l'influence d'un champ magnétique).

A la fin de cette même année, à l'École de Physique et de Chimie de Paris, où son mari, Pierre, est professeur, Marie Curie entreprend à son tour des travaux sur les rayons uraniques. Son approche diffère de celle d'Henri Becquerel. Alors que ce dernier se préoccupait davantage de qualifier ces rayons, Marie Curie, elle, tente de les quantifier. Utilisant des instruments comme l'électromètre et le quartz piézoélectrique, mis au point par les frères Pierre et Jacques Curie, ses recherches s'appuient sur des comparaisons : existe-t-il d'autres corps émettant des rayons similaires ? Son mari entre en scène, à ses côtés.

Partant de la « pechblende », qu'ils estiment quatre fois plus radioactive que l'uranium, les Curie découvrent qu'elle contient une substance très radioactive, mais inconnue. Après plusieurs traitements chimiques, ils annoncent, en juillet 1898, la découverte du polonium, et en décembre de la même année, en commun avec Gustave Bémont, celle du radium. Au phénomène de l'émission spontanée de rayonnements, Marie Curie donne un nom : radioactivité.

Dès lors, la communauté scientifique s'intéresse de très près à ces substances et à leurs rayonnements. Les travaux s'intensifient, les publications se multiplient. La radioactivité fait naître un nouveau champ d'études impliquant deux disciplines. D'une part, la physique, à laquelle se rattachent l'instrumentation et le savoir-faire. D'autre part, la chimie, pour tout ce qui concerne les traitements des substances ➽

Expositions en cours à Paris

Une flânerie au Parc Floral de Paris, dans le Bois de Vincennes, peut être l'occasion de visiter l'exposition intitulée, « La communication chez les animaux ». On y découvre les différents procédés qu'utilisent les animaux sauvages pour échanger des informations.

L'Institut Henri Poincaré présente une exposition autour du thème « Formes et Figures ». Outre une collection d'objets mathématiques appartenant à l'Institut, on peut y admirer des œuvres du sculpteur belge, Thérèse Chotteau. Ce haut lieu des mathématiques et de la physique théorique, créé à la fin des années 1920 et récemment restauré, se trouve rue Pierre et Marie Curie, dans le 5e arrondissement.

La découverte de la radioactivité reçoit cette année tous les honneurs. En témoignent les multiples lieux y consacrant une exposition. La Galerie de Minéralogie du Museum, par exemple, retrace l'histoire naturelle de la radioactivité. Le musée de l'Institut Curie, situé à quelques mètres de l'Institut Henri Poincaré a, quant à lui, fait peau neuve pour sa réouverture. Essentiellement consacré à l'histoire française de la radioactivité, marquée par les noms de Curie et de Joliot, il présente des ouvrages et des instruments d'époque. On peut également y trouver toutes les informations nécessaires pour participer aux diverses commémorations du centième anniversaire de la découverte de Becquerel.

1996
400e anniversaire de la naissance de René Descartes

Voilà quatre cents ans, naissait René Descartes, dans un petit village de Touraine. De très nombreuses manifestations, en France et à l'étranger, commémorent cette date anniversaire.
C'est à Châtellerault que se déroule la plus importante manifestation provinciale. Du 29 juin au 27 octobre, la ville présente une exposition autour du thème « Descartes et la science » (1). Son but ? Montrer la façon dont sa réflexion philosophique et métaphysique intervenait dans sa pratique de savant. Qu'y trouve-t-on ? Des ouvrages originaux, des instruments, des modelages et des sculptures. Le choix de ces œuvres illustre la philosophie mécaniste de Descartes, son soutien à Galilée et à Harvey (la circulation du sang), ainsi que ses travaux sur les animaux-machines.
Parmi la pléthore ➽

radioactives. Difficile dans ces conditions de déterminer la discipline du Prix Nobel, pour récompenser un radioactiviste. Les rivalités s'exacerbent. Les chimistes s'opposent à l'attribution du Nobel de physique aux époux Curie, en 1903. Sans succès. En 1911, l'affront est lavé. Marie Curie reçoit, seule, le prix Nobel de chimie.

La communauté des radioactivistes se structure à travers un réseau de laboratoires. Dans l'entre-deux-guerres, quatre d'entre eux dominent : l'Institut du radium de Paris, dirigé par Marie Curie; celui de Vienne, dirigé par Stefan Meyer; le laboratoire Cavendish, à Cambridge, avec à sa tête Ernest Rutherford; le Kaiser Wilhelm de Berlin, sous le patronage de Otto Hahn.

S'ils ont de nombreux traits communs, ces laboratoires conservent leurs propres caractéristiques. Chacun d'eux possède un savoir-faire, des systèmes expérimentaux et des programmes de recherches spécifiques. Celui de Marie Curie axe ses activités sur le développement de méthodes de purification et d'extraction des radioéléments, ainsi que sur la préparation de sources radioactives et l'étude de leurs propriétés. Des recherches qui vont contribuer à la naissance, puis au développement, de l'industrie des radioéléments. Le laboratoire d'Ernest Rutherford s'intéresse, pour sa part, aux transformations radioactives, à l'étude des mécanismes et des produits de désintégrations.

A partir des années 1920, la diffusion de nouveaux systèmes expérimentaux permet de mieux appréhender le champ de la radioactivité. L'électromètre et l'électroscope, utilisés dans les laboratoires de radioactivité, sont remplacés par la chambre de Wilson et le compteur Geiger. En outre, certains laboratoires s'orientent progressivement vers l'étude de la constitution de l'atome et, en particulier, de son noyau. Une nouvelle discipline émerge : la physique nucléaire. Un événement va permettre de mesurer les profondes modifications survenues dans le domaine de la radioactivité : la seconde guerre mondiale. ●

PAR SORRAYA BOUDIA,
CRHST - PARIS 7

Pour obtenir le programme des manifestations :
Téléphone (1) 69 07 07 28
Minitel 3615 CENTRAD

Interview

M. Louis Bucciarelli, vous avez récemment fait paraître un livre sur la conception de produits par des équipes d'ingénieurs (1), dans lequel vous développez une approche ethnographique du processus de conception. Ingénieur vous-même, comment en êtes-vous venu à aborder les pratiques de conception d'équipes-projet sous un angle ethnographique?

Louis Bucciarelli : Deux motifs m'ont guidé. Tout d'abord, en tant qu'universitaire responsable de la formation des ingénieurs, je pense que nos étudiants doivent être préparés à toutes les complexités de la pratique du métier d'ingénieur. Je suis également convaincu que les cursus académiques traditionnels sont incapables de remplir ce rôle. En outre, j'ai toujours été intéressé par la recherche en sciences sociales, particulièrement lorsqu'elle prend comme objet les sciences et la technologie. J'ai d'ailleurs écrit, il y a quelques années, en collaboration avec Nancy Dworsky, également du MIT, un livre sur l'une de vos compatriotes, la mathématicienne Sophie Germain (2).

Sophie Germain n'est-elle pas la seule femme du début du XIXe siècle à avoir reçu un prix de l'Institut, pour des travaux sur l'élasticité, proches justement des préoccupations des ingénieurs?

Louis Bucciarelli : C'est une histoire d'autant plus fascinante qu'elle a d'abord travaillé en mathématiques pures, en théorie des nombres, avant de se tourner vers la physique. Selon nous, le prix reflète le fait que d'autres, et tout particulièrement Lagrange, ont pu se servir de ses résultats sur les vibrations des plaques élastiques pour approfondir leur conception de l'élasticité. Sophie Germain a d'ailleurs très certainement été influencée par l'approche de Lagrange durant la rédaction du mémoire qu'elle propose à l'Académie.

Vous avez publié cet essai, il y a quinze ans environ. Quelles difficultés avez-vous alors rencontrées en abordant l'histoire des sciences?

Louis Bucciarelli : En fait, bien avant de rencontrer Sophie Germain, je m'étais efforcé de comprendre les travaux de Navier. On attribue à celui-ci la dérivation d'un ensemble d'équations qui décrit le comportement d'un continuum élastique de forme quelconque. Ce développement constitue un cadre où viendra s'inscrire l'ensemble des développements ultérieurs concernant l'évolution de la théorie de l'élasticité. Quand j'ai commencé à lire les textes originaux de Navier, j'ai été

1996, 400e anniversaire de la naissance de René Descartes

de conférences parisiennes, la Société Française de Philosophie organise un colloque sur le thème de « L'esprit cartésien » (2). Il se déroulera dans l'enceinte de la Sorbonne (5e ardt.), du 30 août au 3 septembre. Les diverses sessions porteront notamment sur « La science et ses modèles », ou encore « Penser la technique ».
Par ailleurs, l'équipe de Jean Dhombres (CNRS, unité de recherche 21), sur la lancée de ses deux précédents ateliers de réflexion autour de Descartes, prépare une troisième journée de travail (3), prévue le 7 décembre 1996. Les participants seront invités à réfléchir sur le thème : « Descartes et les principes de conservation, une filiation de la pensée cartésienne jusqu'à aujourd'hui ».
Enfin, notons la réalisation d'un CD-ROM « Descartes l'Européen », préparé par l'Espace Mendès-France de Poitiers (1 place de la Cathédrale, 86 000 Poitiers). Les documents et animations présentés sont destinés à situer Descartes dans l'Europe du XVIIe siècle. ●

1 - L'exposition se déroule à La Redoute, boulevard Blossac, Chatellerault.
2 - Renseignements auprès de Chantal Iannarelli, 96 avenue de Suffren, 75015 Paris
3 - Renseignements auprès de l'UPR 21, 27 rue Dasmesme, 75013 Paris.

surpris de découvrir que son modèle et la base de sa dérivation, étaient radicalement différents du modèle continu que nous enseignons aujourd'hui aux étudiants. En fait, le modèle de Navier ne conduit pas aux systèmes d'équations décrivant le comportement d'un continuum élastique. On fait pourtant de Navier le père fondateur de la théorie de l'élasticité, presque au même titre que la paternité de la théorie de la gravitation pour Newton. L'histoire des sciences devenait ici infiniment plus intéressante que les manuels universitaires.
En outre, paraissait au même moment l'ouvrage de Kuhn sur la structure des révolutions scientifiques. Je réalisai donc que la coexistence de différentes conceptions au sein d'un même champ était possible, et qu'il n'était pas forcément simple d'évaluer ces théories rivales. Cette prise de conscience constitua une stimulation, voire un défi, qui s'intensifia quand je commençai à m'intéresser à Sophie Germain.

De quelle manière?

Louis Bucciarelli : Il était clair que l'analyse faite par Sophie Germain des modes de vibration des plaques minces était erronée. La tâche que je me fixai fut d'expliquer simultanément pourquoi elle s'était trompée, et le fait qu'elle ait reçu un prix pour son travail. L'attribution du prix peut se comprendre si l'on considère les intérêts des savants engagés en même temps que Sophie Germain sur le problème de l'élasticité. Les sources montrent, de manière plutôt convaincante, qu'elle bénéficiait ainsi du soutien de Legendre et Lagrange, qui appuyaient ses recherches mathématiques. Mais il est beaucoup plus difficile de montrer en quoi elle s'est trompée dans son approche physico-mathématique.
Il paraît simple d'expliquer les succès des savants anciens, dans la mesure où leurs travaux peuvent être, sans trop d'effort (quitte à considérer dépassés certains aspects de méthode et de présentation), mis en correspondance avec les perspectives modernes. C'est en revanche, un vrai problème de reconstruire les étapes de raisonnement qui conduisent à une analyse défectueuse. Le défi de la recherche historique apparaît plus pleinement lorsqu'on cherche à expliquer l'échec.

Si l'on considère votre ouvrage sur les ingénieurs, deux des trois projets que vous avez étudiés se sont avérés des échecs. S'agit-il aussi d'expliquer ce qui a mal tourné?

Louis Bucciarelli : Les difficultés de l'approche ethnographique sont autres. En histoire, la durée sert le chercheur, elle agit comme un filtre; les sources d'information qui ont survécu jusqu'à nous sont en nombre limité, et leurs lieux de conservation sont en général assez concentrés et connus, pour qu'il soit relativement aisé à l'historien d'identifier et retrouver les sources les plus pertinentes. Celui-ci dispose de points de départ, dans la littérature secondaire par exemple, et même si le chercheur peut s'égarer sur quelques fausses pistes, il finira par remonter à des sources dignes d'intérêt, à travers les archives, les collections privées, et aujourd'hui, internet.
Le temps joue un rôle différent pour l'ethnographie, au point que l'on pourrait parfois le considérer presque comme une contrariété : c'est le tempo qui devient crucial, il faut être présent au bon endroit au bon moment. Et l'information est partout; tout est information, comme me l'a enseigné ma collègue Sharon Traweek (3). Mais comment dégager l'information pertinente des observations triviales? Il n'y a pas de règle établie. L'étude de projets techniques menés par des ingénieurs est donc une affaire délicate, mais d'un intérêt très immédiat pour la formation des ingénieurs. Faire sens de ces trois projets techniques dans les termes que je m'étais fixés, confronté à la complexité et la banalité des événements quotidiens, ne fut pas une mince affaire.

Quels objectifs vous étiez-vous fixés?

Louis Bucciarelli : Je voulais acquérir une meilleure compréhension de la manière dont les ingénieurs de terrain utilisent les méthodes et les concepts de la science et des techniques dans le processus de conception; c'est-à-dire ces méthodes et concepts qui leur ont été enseignés dans leurs programmes de formation. Remarquez bien que j'entends la notion de conception *(design)* dans son acception la plus large, de manière à y inclure l'élaboration des concepts, l'évaluation des performances et de l'efficacité, le développement et le test de prototypes, l'élaboration de procédures de fabrication, l'estimation des

La formation de la pratique scientifique

Le discours de l'expérience en France et en Angleterre (1630-1820).

Comment l'expérience de la nature est-elle faite et écrite aux XVIIe et XVIIIe siècles ? A la fin des années trente, Bachelard propose une histoire de la révolution expérimentale, arc-boutée sur la genèse des concepts et de « la » méthode. Là où il parle d'esprit scientifique, Licoppe écrit pratique scientifique. Il prend pour objet le « faire » des savants et des *natural philosophers*. Ceux-ci, dans la France et l'Angleterre des années 1630-1820, se consacrent aux « sciences baconiennes » : l'optique, la pneumatique, le magnétisme, l'électricité, la chaleur. En abordant conjointement les pratiques matérielles, sociales et littéraires des physiciens, l'ouvrage s'inscrit dans la lignée de l'historiographie des sciences anglo-saxonnes. Une récente analyse de la controverse entre Boyle et Hobbes (1) l'a brillamment illustrée.
Un tel héritage n'entrave aucunement la démarche de l'auteur. Il entend bien explorer ce qui a légitimé le recours à l'expérience empirique (soit une activité locale et singulière) pour élaborer un discours général sur la nature. Outre les dispositifs matériels, les gestes et les savoir-faire mis en œuvre (et mis en scène) dans la pratique expérimentale, son enquête vise surtout les formes du discours savant : ce dont on parle, comment on en parle, et à qui on en parle.
L'auteur situe donc son écrit à la croisée de deux histoires. Celle des groupes de physiciens, relatant leurs formes de sociabilité et leurs relations aux pouvoirs, et celle de la production et de la circulation des représentations. Il peut ainsi analyser les variations des « récits d'expérience », sur une longue période. Les textes expérimentaux des XVIIe et XVIIIe siècles constituent sa thèse centrale. Celle-ci démontre la prédominance de trois registres d'administration, caractérisant la preuve expérimentale : les « régimes de la curiosité, de l'utilité et de l'exactitude ».
Le premier texte de ce type se situe à la fin du XVIIe siècle. Il contraste avec l'argumentation hypothético-déductive qu'affectionnent les géomètres et mécaniciens de l'époque. Sa trame se tisse autour d'un événe-

coûts, tout comme les techniques d'assemblages ou de dessin utilisant la conception assistée par ordinateur. Je voulais observer comment étaient prises les décisions, et élaborer un modèle de ce processus.
Sur la base de mes observations, j'aurais pu être tenté de décrire le processus de conception comme un processus chaotique, ce qui m'aurait placé au cœur des modes actuelles. Mais, plus sérieusement, j'en suis venu à considérer que la clé de toute l'affaire était le processus social de négociation, riche d'ambiguïtés et d'incertitudes, dans lequel différents participants, exerçant des compétences et des métiers différents, élaborent graduellement leur objet final. ●

Propos recueillis par Christian Licoppe

1 – Louis Bucciarelli, *Designing Engineers*, MIT Press, 1994.
2 – Nancy Dworsky and Louis Bucciarelli, *Sophie Germain : An Essay in the History of the Theory of Elasticity;* Reidel, 1980.
3 – Ethnographe de formation, observant les pratiques des physiciens, et auteur de *Beamtimes and Lifetimes, The World of High Energy Physics*, Harvard University Press, 1988.

---

ment expérimental unique. Ce dernier doit être spectaculaire et « curieux » afin d'intéresser un public de savants et de gentilshommes lettrés. Organisé selon un enchaînement du type « X fit et X vit », le récit emprunte aux formes de la civilité aristocratique. La véracité des faits décrits est, quant à elle, garantie par le rang et l'autorité des témoins.
Le « X » adopte diverses formes en fonction du temps et de l'espace. Au « je » individuel, privilégié par les savants anglais, s'oppose, en France, le « on » des membres de l'Académie des sciences. Un choix peu surprenant de la part de ce corps collectif et clos, modelé sur la société de cour et générant des savoirs « sous le regard du Roi ». Or, le monarque absolu s'accorde mieux des mesures des géomètres et astronomes que des manipulations des « physiciens ». D'où, souligne l'auteur, les difficultés rencontrées par les physiciens français pour passer un contrat stable avec le pouvoir.
A partir du XVIIIe siècle, plusieurs éléments du récit subissent des modifications. D'une part, la forme « X fit et X vit » devient « X fit et il s'ensuivit que ». D'autre part, le témoin s'efface devant l'effet. Enfin, la curiosité laisse place à la régularité. Il ne suffit plus que les faits relatés soient intéressants pour convaincre le lecteur. Ils doivent être reproductibles et, de surcroît, utiles. Lorsqu'on obtient un effet reproductible, celui-ci sort des cercles académiques pour être diffusé dans des ateliers et cercles d'amateurs. Sans prétendre à la causalité, l'auteur rattache cette évolution à l'émergence, au cours de la première moitié du XVIIIe siècle, de deux phénomènes : les nouveaux liens qui se tissent entre la « République des Lettres » et les gens de métiers; le rôle croissant de l'État, français surtout, en tant que commanditaire d'expertise et pourvoyeur « d'offices ».
Enfin, à partir des années 1760, on substitue l'exact à l'utile. Curieux, ingénieurs et négociants sont désormais exclus de la « nouvelle technologie littéraire ». Celle-ci exige des expériences de physique « répétabilité, comparabilité, et réplicabilité ». On les destine à produire des lois générales ainsi que des constantes numériques universelles. C'est l'époque de la preuve par la mesure. De fait, on assiste à un recentrage des activités sur le laboratoire, la construction des instruments de « précision » et la maîtrise de leur fonctionnement. Là encore, l'implication du « champ social » oppose les savants anglais et français. Les premiers proposent des savoir-faire à des acteurs évoluant dans la sphère de la circulation marchande. Ils s'attachent avant tout à la répétition des expériences et à la simplification des instruments. A l'inverse, leurs homologues français proposent des lois universelles à des acteurs politiques. ●

Compte-rendu du livre de Christian Licoppe, par J. P Gaudilliere

1- Analyse menée par Simon Schaffer et Steven Shapin, *Leviathan et la pompe à air*, La Découverte, 1993.

« BOUM ta science » et l'Association Nationale des Petits Débrouillards

L'Association Nationale des Petits Débrouillards fête ses dix ans. Créée à l'initiative d'animateurs, d'enseignants et de chercheurs, elle conçoit et met en œuvre des activités pédagogiques, présentées sous forme d'animations. Ses partenaires : des écoles, des centres culturels, des foyers ruraux ou des maisons des jeunes et de la culture.
En France, les Petits Débrouillards comptent déjà une centaine de clubs en Ile-de-France, Bretagne, Midi-Pyrénées, Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes… Un succès qui ne se limite pas à l'hexagone. Regroupés en Association Internationale, les Petits Débrouillards ont fait des émules au Québec, en Algérie, au Maroc, en Italie, au Portugal, en Belgique, en Slovaquie, en République Tchèque, au Mexique, au Venezuela, en Argentine, en Russie et au Koweit.
Que proposent les Petits Débrouillards ? Des ateliers, autour d'expériences simples, montés par les enfants avec l'aide d'animateurs (enseignants, parents ou volontaires) formés par l'association. Le matériel utilisé est élémentaire : bouteilles en verre ou en plastique, piles, eau, fils électriques, ficelles, poids, poulies, etc. Les enfants ont ainsi une double activité : manuelle, en confectionnant eux-mêmes les instruments de leurs expériences; intellectuelle, en réfléchissant, avec les animateurs, à leur propre représentation des phénomènes qu'ils créent.
Outre les ateliers, les Petits Débrouillards possèdent d'autres cordes à leur arc : diffusion des documents d'expériences et d'initiation scientifique; organisation de séjours; vaste distribution de leur magazine « BOUM ta science » dans les écoles.
Destinée aux enfants âgés de sept ans et plus, cette revue d'éveil scientifique est éditée par l'Association. Son sommaire offre une large palette de rubriques régulières :

- un entretien avec une personnalité ou un spécialiste du monde scientifique et technique, préparé et réalisé par les enfants.
- un événement lié à l'actualité, dont le but est d'éveiller la curiosité des enfants, en présentant le développement des diverses branches de la science sans omettre, s'il y a lieu, les inconvénients.
- des dossiers à thèmes présentés par Zigo, le héros du journal, qui raconte à chaque numéro une nouvelle histoire : celle de l'électricité, de la cuisine, de la météo, etc.
- des expériences que les jeunes lecteurs peuvent réaliser eux-mêmes, avec peu de moyens.
- de l'histoire, avec la collaboration d'historiens.
- une « leçon de choses » d'autrefois, dans la rubrique « ça existe », qui présente un animal, une plante ou un objet mathématique.
- la vie des clubs (activités, rencontres).
- la présentation d'expositions et d'ouvrages susceptibles d'intéresser les scientifiques en herbe.

Foisonnant de projets, les Petits Débrouillards ne sont guère inquiets quant à leur avenir. Une grande encyclopédie est en préparation avec Albin Michel. Et de nombreux autres ateliers devraient bientôt être créés. Cette mesure s'inscrit dans le projet de réforme de l'éducation des sciences à l'école (projet « Charpak »), et dans les programmes destinés aux jeunes de quartiers en difficultés. L'Association a déjà mis en place un plan de formation d'animateurs en vue d'assurer l'encadrement nécessaire. Ce travail auxiliaire d'éducation offrirait un double avantage à de nombreux étudiants : une préparation sociale et professionnelle intéressante; un revenu d'appoint non négligeable.

par Dominique Pestre

Association Nationale des Petits Débrouillards, Cité des sciences et de l'industrie, Halle aux Cuirs, 75930 Paris Cedex 19.
Tél : 40 05 75 57; Fax : 40 05 79 21.